

JAERI-M
9593

OG L-1FPプレートアウト測定における
沈着量換算係数

1981年7月

馬場 治・露崎 典平・斉藤 隆
後藤 一郎・奥田 豪博*・渡辺 久**

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

OGL-1 FPプレートアウト測定における沈着量換算係数

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

馬場 治・露崎 典平・斉藤 隆・後藤 一郎

奥田 豪博*・渡辺 久**

(1981年7月9日受理)

多目的高温ガス炉一次系におけるFP挙動を調べるため、OGL-1で非破壊測定法によりFPプレートアウト測定を行っている。管壁を透過した γ 線を配管外部に設置したGe検出器により測定する。この測定では計測された γ 線のピークの計数率から沈着量へ換算する沈着量換算係数を別途求めておく必要がある。

現在実施中の各測定点は、配管構造、検出器配置がすべて異なるため、検出器の感度分布を実測し、各測定点の換算係数はこの実測値と幾何学的配置から計算により求めた。本報告書では感度分布測定方法、換算係数算出方法およびその結果について報告する。また、OGL-1 FPプレートアウト測定における測定誤差と、本報告に含まれる換算係数の妥当性についても検討したので、合わせて報告する。

* 外来研究員；川崎重工㈱

** 原子力エンジニアリング㈱

Conversion Coefficient for FP Plate-Out
Measurement in OGL-1

Osamu BABA, Noriyoshi TSUYUZAKI, Takashi SAITOH,
Ichiro GOTOH, Takehiro OKUDA* and Hisashi WATANABE**

Division of JMTR Project, Oarai Research Establishment, JAERI

(Received July 9, 1981)

FP plate-out measurement is being carried out in OGL-1 in order to investigate a fission product behavior in primary circuit of VHTR by a non-destructive method. γ rays penetrating pipe wall are measured using Ge detectors located outside of pipe. It is essential to determine a plate-out conversion coefficient, which converts a measured γ ray peak counting-rate into a plate-out activity, by another method. Conversion coefficient for each measuring point was calculated with detector sensitivity distribution measured and geometrical arrangement, because pipe structures and detector arrangements are different for all points currently measured.

In this paper, reported are a technique for measurement of sensitivity distribution, a method for calculation of conversion coefficient, and their results. Besides, error in OGL-1 FP plate-out measurement and propriety of conversion coefficients reported are discussed.

Keywords ; Fission Product, FP Plate-out, OGL-1, VHTR, JMTR Reactor,
Ge Detector, γ Ray, Primary Coolant Circuits

* On leave from Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

** Nuclear Engineering Co.,

目 次

まえがき	1
1. OGL-1におけるFPプレートアウト測定	2
1.1 測定方法概要	2
1.2 測定上の問題点と対策	2
2. 換算係数の求め方	7
2.1 測定系のモデル化と基礎式	7
2.2 換算係数計算プログラム	9
2.3 検出器感度分布測定方法	10
3. 結 果	13
3.1 検出器感度分布	13
3.2 換算係数	14
4. 換算係数算出における誤差	33
4.1 誤差の考え方	33
4.2 誤差の評価	35
5. 結論および考察	39
あとがき	43
謝 辞	43
参考文献	44

Contents

Foreword	1
1. F.P. plate-out measurement in OGL-1	2
1.1 Measuring method	2
1.2 Problems in measurement and counterplan	2
2. Conversion Coefficient	7
2.1 Modelling of the measuring system and basic formulae for conversion coefficient	7
2.2 Calculation program	9
2.3 Measuring method of Ge-detector sensitivity	10
3. Results	13
3.1 Detector sensitivity	13
3.2 Conversion coefficient	14
4. Errors in conversion coefficient	33
4.1 Analysis	33
4.2 Estimation	35
5. Conclusion and discussion	39
Postscript	43
Acknowledgment	43
References	44

Tables

Table 1	Plate-out measuring points
Table 2 to 4	Sensitivity measurement condition
Table 5	γ -ray relative yield in Eu-152
Table 6	Value of ΔF_{AM}
Table 7	Value of E_{RZ}

Figures

Fig.1	In-situ measurement of the fission product plate-out in OGL-1
Fig.2	OGL-1 Plate-out measuring system
Fig.3	Sensitivity of Ge-detector in shielding with a collimator
Fig.4	Conversion Coefficient calculation model
Fig.5	Approximation of outer pipe and thermal insulator
Fig.6	Flow diagram of KKKP
Fig.7 to 18	Vertical and horizontal direction characteristics of a Ge detector
Fig.19 to 25	Conversion coefficient of detector number 1
Fig.26 to 33	Conversion coefficient of detector number 2
Fig.34 to 39	Conversion coefficient of detector number 3
Fig.40	Interpolation of detection efficiency
Fig.41, 42	Comparison of normalized detection efficiency between calculation and measurement
Fig.43	Horizontal direction characteristics of detector No.1, 2 and 3
Fig.44	Conversion coefficient calculation and measurement result

ま え が き

高温ガス炉では、被覆粒子燃料から微量の核分裂生成物(FP)が、被覆層中の拡散、同層の破損および被覆層、マトリックスの核燃料物質の汚染などにより、一次冷却材中に放出される。放出されたFPは一次系を循環し、各機器および配管の内面へ沈着する。このため一次冷却材中のFPの配管内面沈着などの挙動と、そのメカニズムを知ることは、高温ガス炉の遮蔽設計、保守点検時の一次系への接近方法および事故時のFP放出量の推定などに不可欠である。

OG L-1⁽¹⁾の一次系は、FP沈着に関し、高温ガス炉とほぼ同等と考えられるので、OG L-1一次系配管機器を対象にしてFPプレートアウト研究を進めることが計画された。

OG L-1は高温ガス炉用燃料および材料の高温照射装置であり、FP沈着分布を測定するためにひんばんに一次系配管を切断、取り外すことは構造上困難である。またFPプレートアウト研究の上からは、配管上の同一点におけるFP沈着量の変化を、OG L-1の運転履歴と関連させて知ることが望ましい。このために、米国において開発され、使用実績のある非破壊測定法^{(2),(3),(4)}を適用することが提案され、その測定装置が試作された^{(5),(6)}。これは一次系配管内面に沈着したFP核種が放出するガンマ線を配管外側からGe検出器で測定するもので、ガンマ線スペクトル中のピークエネルギーおよび計数率からFP核種の同定および定量を同時に行うものである。

試作された測定装置を用いて、昭和52年3月のJMTR第39サイクルから5運転サイクルにわたり、OG L-1一次系のFPプレートアウト予備測定が行われ、測定法の有効性が実証された^{(5),(6),(7)}。

これらの予備測定の実績を踏まえて、OG L-1におけるFPプレートアウト測定のための実用装置が設計、製作された⁽⁸⁾。OG L-1においてはこの実用装置を用いた本格的測定を昭和54年2月の第45サイクルより開始している。

本報告書は、この実用装置を用いてFP沈着の定量測定を行う際に必要な沈着量換算係数について述べたものである。この換算係数の求め方には、すべて実験で求める方法と、実験と計算の組み合わせで求める方法⁽⁷⁾がある。OG L-1 FPプレートアウト測定においては、検出器と測定点の組み合わせが非常に多く、換算係数をすべて実験で求めるのは実際的でないので、予備測定において行われたのと同様に、実験と計算の組み合わせにより換算係数を求めた。

以下に換算係数の求め方、OG L-1各測定点に対する換算係数算出結果、FP沈着測定における誤差の評価について述べ、さらにOG L-1照射試料のハンガーロッドに対して実験的に求めた換算係数の値と、計算により求めた値の比較結果を示す。

1. OGL-1におけるFPプレートアウト測定

1.1 測定方法概要

高温ガス炉における一次系遮蔽設計，安全解析，保守点検計画等の線源評価のための基礎データを得，更に解析コード検証のために利用することを目的として，OGL-1を用いてFPプレートアウト測定が行われている^{(5),(6),(7),(9)}。

測定は，配管内面に沈着した核種からの γ 線を，配管外側よりエネルギー分解能の良いGe検出器を用いて行う。計測された γ 線はそのエネルギーより核種が推定され，計数率より沈着量が求められる。測定された γ 線は配管内表面に吸着した核種および配管壁内部に拡散侵入した核種から放出されたものであり，これらを区別することはできない。使用している検出器は，検出部の遮蔽，移動，設置スペースを考慮して「たて型，下向きクライオスタット」の可搬型高純度Ge検出器である。検出部の遮蔽は厚さ約10cmの鉛で行っており，配管測定点の方向に長方形の開口部を有するコリメータが設けられている。長方形コリメータの長軸は，配管の軸方向と一致させている。測定方法の概略をFig. 1に示す。

測定点とコリメータの開口方向は，バックグラウンドができるだけ低いことおよび，測定対象の配管の背後の線源の無いことを条件にして決定している。各測定点の周囲の空間が狭く，コリメータが重いため，コリメータは各測定点に固定し，検出器のみ移動する方法を採用している。測定点は高温配管の三重管部に1ヶ所，二重管部に5ヶ所，単管で外側に保温材を有する部分に8ヶ所の合計14ヶ所である。測定点をTable 1に示す。各測定点における配管と検出器との距離を一定にすることは，設置スペースの関係からできず，すべて異っている。

測定に用いているシステムをFig. 2に示す。この測定システムの実用的な検出感度は約 $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ である。

これまでに検出された主な核種は ^{137}Cs ， $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ， ^{131}I ， ^{60}Co ， ^{51}Cr ， ^{54}Mn などであり，このうち分布として得られているのは ^{137}Cs ， $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ， ^{131}I ， ^{60}Co である。これまでに測定された最大の沈着量は ^{131}I の $1 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ である。

1.2 測定上の問題点と対策

配管の内面に沈着している核種は種類が多くて沈着量が少ない。沈着分布を簡単に，かつ継続して測定する方法として，配管外側からGe検出器を用いて測定する非破壊法を採用した。しかしOGL-1は高温ガス炉用燃料，材料照射施設で，キュービクル内が狭く，検出器の適当な設置場所が考慮されていないなど測定環境が厳しいので，次の点が問題になっている。

- (1) 各測定点の換算係数がすべて異なる。
- (2) 測定点以外からの γ 線に対する遮蔽が十分にできない。
- (3) 配管の熱膨張による移動量が正確に把握できない。

- (4) 配管の円周方向に一様に沈着しない場合がある。
 (5) 短半減期核種の沈着量測定が困難である。

これらの問題点とその対策を以下に詳述する。

(1) 換算係数の算出

F P 沈着機構を解明するためには、できるだけ多くの点の沈着量を測定することが望ましい。しかし現実には測定点を決定する際には、検出器を設置するスペースの制約が大きいため設置個数、場所が限られ、更に、配管、コリメータ、検出器の相対位置関係が全て異なっている。そのうえ、沈着量が少ないので計数率が低く、計数率の統計誤差を小さく抑えるために測定時間は、測定点1ヶ所1回当たり約20時間である。測定は原子炉の停止期間中に行うので、限られた時間内に測定を完了させるために3台の検出器を使用している。

測定系のモックアップを製作して換算係数を実験により求めることは、配管、コリメータ、検出器の組合せが多くなりすぎて現実的でない。このため、コリメータと検出器の組合せによる各検出器の感度分布は実験により求めた。この感度分布は検出器とコリメータの組合せに固有な部分であり、計算により求める技術がまだ確立していない。配管内面の沈着核種による γ 線が配管壁面を通りコリメータに到るまでの減衰は、測定点の構造をモデル化し、遮蔽計算を行って求めた。その結果、検出器およびコリメータを変更せずに測定点のみを追加または変更する場合には、容易に換算係数を求めることができる結果となった。

(2) 遮蔽不足対策

検出器は高価なため測定点と同じ数だけ揃えられなかったので、1台で数箇所を測定する必要がある。キュービクル内は非常に狭く、十分に鉛遮蔽を施したコリメータを設置するスペースは無い。検出器に鉛コリメータを直接取り付けると、重量が大きくなりすぎて、移動の容易さ及び安全性の面から適当でないと考えられたのでコリメータは固定常置式とされている。

実際にGe検出器で計測される γ 線は、コリメータ窓を通して入射した γ 線と、コリメータ窓以外から入射して来た γ 線の合計量である。コリメータの鉛遮蔽を透過して来る γ 線量を、コリメータ窓を通過して来る γ 線量に対して十分に小さくするように、鉛遮蔽の厚さは10cmとなっている。

測定対象にしている配管の後方に強い γ 線源がある場合、この線源からの γ 線を配管に沈着しているFPの γ 線と分離できないために沈着量の測定は不可能となる。また遮蔽が不足している検出器の上方から入射して来る γ 線は後述するように、コリメータ開、閉の二度の測定により、測定結果から除くことはできるが測定誤差を大きくする原因になる。従って、測定対象にしている配管の後方には強い γ 線源が無い様に、また検出器の遮蔽が不足している部分から入射して来る γ 線量が少なくなる様に、コリメータの取付け方向が選定されている。

この遮蔽不足の部分からの γ 線が測定値に与える誤差を少なくするために、コリメータ窓を開けた状態で測定した計数率から、コリメータ窓を閉じた状態で測定した計数率を差し引いた値をコリメータ窓からのみ入射して来た γ 線の計数率としている。したがって、測定点1点につきコリメータ窓を開けた状態と閉じた状態での2回の測定が、必要である。

(3) 配管移動に対する対策

OGL-1の配管は、運転中に熱膨張により変位する。変位量大きい測定点では数10mmにもなり、また変位方向も不確かだ配管がコールドになった状態で元の位置に戻っている保証

はない。従って各サイクル終了後の配管と検出器の位置関係が異なるため配管位置を測定する必要があるが、サイクル毎の配管位置測定は非常に困難で、場所によっては不可能である。それ故に、配管の移動が換算係数に与える影響を少なくする必要がある。

コリメータ窓を通して検出器が望む配管が、平面と見なせる程度になるまでコリメータ窓を小さくすれば、換算係数は配管と検出器間の距離に関係しなくなるが、一方、配管内面の沈着量が少ないため、検出感度を上げるには、コリメータ窓の有効面積を大きくする必要がある。これらの、一見相反する要求に答えるため、コリメータは開口部形状を長方形とし、開口部寸法は測定対象管寸法および検出器のGe結晶寸法から許される最大の寸法とした。その結果、コリメータ長方形開口部のうち、短辺の長さは管径で制限され最大10mm、長辺はGe結晶大きさで制限され、最大40mmである。コリメータはその長軸方向を管軸方向（水平配管、垂直配管があるため）と一致させて使用し、管中心-検出器中心間距離は約350mmである。

(4) 円周方向の沈着分布

OGL-1の一次系は複雑に配管されているので、管の円周方向に沈着分布がある可能性があるが、この沈着分布は小さいものと考え、現在の測定では円周方向沈着分布は無視されている。円周方向のガス、管壁温度分布およびダストの影響が少ない所として、水平配管では中心部側面を測定している。

(5) 短半減期核種の測定

現在の測定は、測定点付近のバックグラウンドの変動、検出器液体窒素の補給などの理由から炉停止期間中に行われている。炉停止後、OGL-1ループキュービクル内立入が可能となるまで約1日が経過してから測定を開始し、全測定が終了するまでに約2週間かかっているため、長半減期の先行核がない短半減期の核種は検出されていない。しかし遮蔽設計、事故時の安全解析、コードの検証には、短半減期核種の沈着についても測定する必要がある。このためには、バックグラウンドの高いループ運転中の沈着量測定を行う必要があるが、崩壊定数が大きいので測定は可能と考えられる。今後検出器遮蔽の改良、液体窒素の自動補給等により改良すべき点である。

Table 1 Plate-out Measuring Points

Point Number	Position
1	Outlet of in-pile tube
2	High temperature duct
3	Inlet of cooler
4	High temperature duct
5	High temperature duct
6	Inlet of No.1 regenerative heat exchanger
7	Outlet of No.1 regenerative heat exchanger
8	Outlet of No.2 regenerative heat exchanger
9	Low temperature duct
10	Outlet of cooler
11	Inlet of filter
12 *	Filter
13	Outlet of filter
14	Outlet of gas circulator

* Conversion coefficient at this point is not included in this report

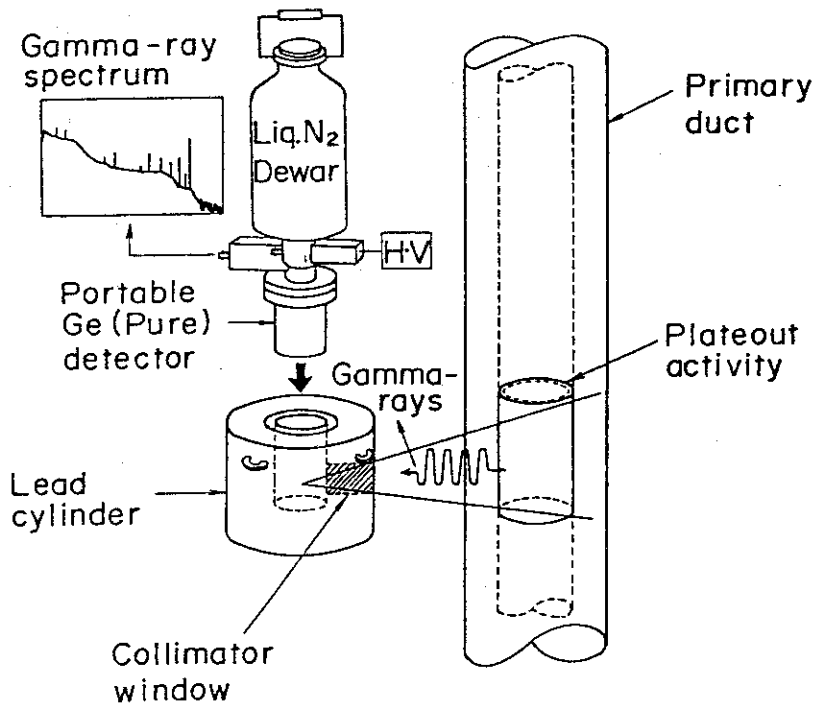


Fig. 1 In-situ Measurement of the Fission Product Plate-out in OGL-1⁽⁸⁾

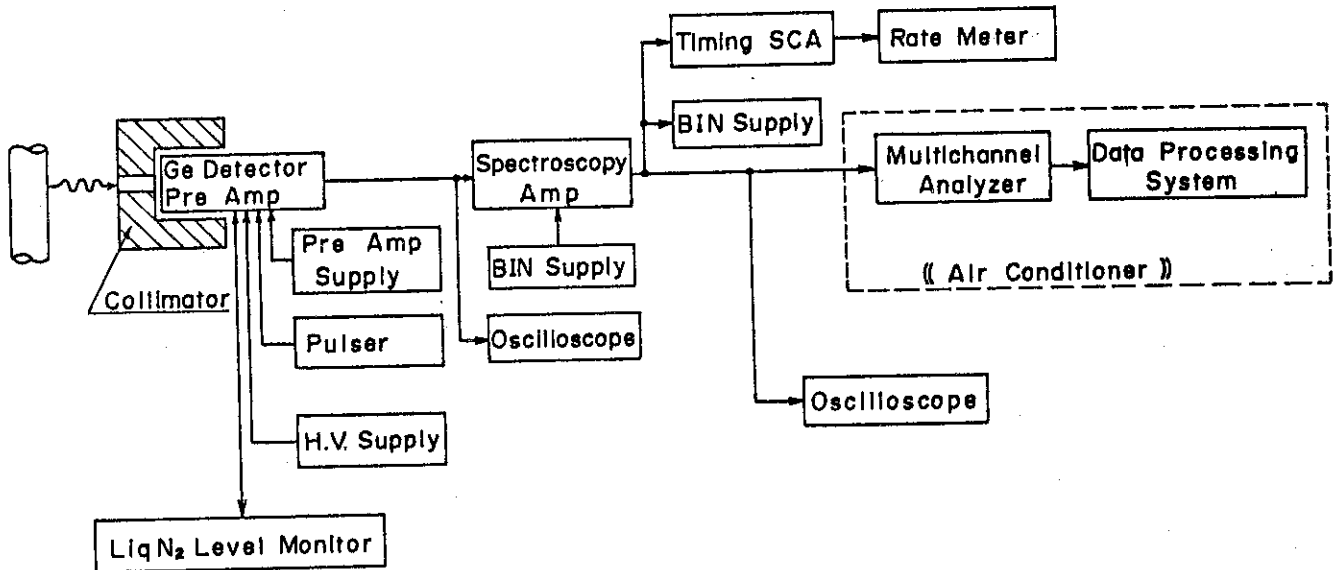


Fig. 2 OGL-1 Plate-out Measuring System

2. 換算係数の求め方

2.1 測定系のモデル化と基礎式

FPプレートアウト測定では、1.1測定方法概要に示したように、配管外側に設置したコリメータ窓を有する遮蔽体内に納められたGe検出器を用いて、配管およびコリメータを通過する γ 線を測定し、FP核種の同定、定量を行う。

この方法における換算係数は、コリメータ内に納められた検出器の感度分布と、 γ 線発生源からコリメータに至るまでの γ 線の減衰より定まる。同一の検出器およびコリメータを種々の測定点に対し使用する場合、コリメータ内に納められた検出器の感度分布は変わらないが、 γ 線発生源から、コリメータに至るまでの減衰が異なる。このため前者を実験により、後者を計算により求めておくことにより、すべての検出器、測定点の組み合わせに対し、容易に換算係数を求めることができる。

コリメータ内に納められた検出器の感度分布は、コリメータ中心軸が最も高く、中心軸より離れるにしたがい低くなると考えられる。使用しているコリメータの形状は長方形であるので、コリメータ前面の任意の角度管軸方向 θ_3 、管軸直角方向 θ_2 (Fig. 3のP点)に対する計数率は、コリメータ中心軸と管軸を含む面、および管軸に直角な面での計数率分布 $F_x(\theta_3)$ 、 $F_y(\theta_2)$ の積に比例するものと仮定する。またFPの沈着量は測定点付近の管周方向および長手方向に対し、均一に分布していると仮定する。すなわちコリメータで見込める範囲内でのFP沈着分布は無視する。

この時、沈着したFPの面線源強度を S_0 (Photon/cm²·s)、検出器の計数率を N_0 (count/s)とすると、Fig. 4より N_0 は次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 N_0 &= 4 \int_0^\pi \int_0^\infty S_0 \cdot dx \cdot r d\theta_1 \cdot \frac{A \cdot B}{4\pi L^2} \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot \eta_D \cdot F_x(\theta_3) \cdot F_y(\theta_2) \\
 &\doteq 4 \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{S_0 \cdot A \cdot B (\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3)^2}{4\pi (\ell_1 - r \cos\theta_1)^2} \cdot r \cdot \eta_D \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot F_x(\theta_3) \cdot \\
 &\quad F_y(\theta_2) \cdot dx \cdot d\theta_1 \\
 &= \frac{A \cdot B \cdot S_0 \cdot r \cdot \eta_D}{\pi} \cdot \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{(\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3)^2}{(\ell_1 - r \cos\theta_1)^2} \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot F_x(\theta_3) \cdot \\
 &\quad F_y(\theta_2) \cdot dx \cdot d\theta_1 \quad \text{①}
 \end{aligned}$$

ここで

η_D : コリメータ正面にある線源に対する検出器の計数効率 (cps/(photon/s))

S_0 : 面線源強度 (photon/cm²·s)

r : 線源半径 (沈着している管内半径) (cm)

L : 微小線源要素 $S_0 \cdot dx \cdot r d\theta_1$ - 検出器中心間距離 (cm)

ℓ_1 : 沈着している管 - 検出器中心間距離 (cm)

x : 検出器中心より, 管軸線へ下ろした垂線の足から微小線源要素のある断面までの距離 (cm)

F_A : 線源から管外面に達するまでの γ 線の減衰

F_x, F_y : x 軸管軸, y 軸管軸と直角方向の規格化された感度分布 (-)

$A \cdot B$: コリメータ窓の寸法 縦 \times 横 (cm)

である。

さらに, Fig. 4 より明らかに

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{r \sin \theta_1}{\ell_1 - r \cos \theta_1} \quad (2)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{x}{\ell_1 - r \cos \theta_1} \quad (3)$$

$F_A(\theta_1, x)$ は, γ 線が線源から管外面 (保温を含む) に到達するまでの減衰である。OGL-1 の FP 沈着測定の場合, 沈着している管の外側に, 内壁管, 圧力管, 断熱材などが存在し, この部分での減衰が大きい。この部分は, FP が沈着している管径に比較し, 充分大きいので, 遮蔽層を平板として近似し, F_A を求める。(Fig. 5 参照) F_A は各遮蔽層による減衰の積で表わされ, 次式のようになる。

$$F_A(\theta_1, x) = \exp \left\{ - \sum_i \mu_i \cdot \rho_i \cdot t_i \cdot \frac{1}{\cos \theta_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_3} \right\} \quad (4)$$

ここで μ_i, ρ_i, t_i はそれぞれ i 番目の遮蔽層における γ 線質量減衰係数, 遮蔽体密度, 遮蔽厚さである。

今, $\ell_1 \gg r$ となるように検出器位置を選び, $\bar{\theta}_2 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{r}{\ell_1}$ とおき, F'_A を次式で定めると,

$$F'_A = \exp \left\{ - \sum_i \mu_i \cdot \rho_i \cdot t_i \cdot \frac{1}{\cos \bar{\theta}_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_3} \right\} \quad (5)$$

$$F_A(\theta_1, x) \doteq F'_A(x) \quad (6)$$

また θ_3 に対し

$$\theta_3 \doteq \theta'_3 = \tan^{-1} \frac{x}{\ell_1}$$

と近似し, ①式を F'_A, θ'_3 を用いて表わすと, ①式の二重積分は分離できて, 次のようになる。

$$\begin{aligned}
 N_o &= \frac{A \cdot B \cdot S_o \cdot r \cdot \eta_D}{\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{F_y(\theta_2)}{(\ell_1 - r \cos \theta_1)^2} d\theta_1 \cdot \\
 &\quad \int_0^\infty (\cos \bar{\theta}_2 \cdot \cos \theta'_3)^2 \cdot F'_A(x) \cdot F_x(\theta'_3) dx \\
 &= \frac{A \cdot B \cdot S_o \cdot r \cdot \eta_D \cdot \cos^2 \bar{\theta}_2}{\pi} \int_0^\pi \frac{F_y(\theta_2)}{(\ell_1 - r \cos \theta_1)^2} d\theta_1 \cdot \\
 &\quad \int_0^\infty \cos^2 \theta'_3 \cdot F'_A(x) \cdot F_x(\theta'_3) dx
 \end{aligned}$$

したがってFPが均一に沈着している管に対する換算係数 $\eta_{total}(\text{cps}/(\mu\text{ci}/\text{cm}^2))$ は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned}
 \eta_{total} &= 3.7 \times 10^4 \cdot \frac{N_o}{S_o} \\
 &= 3.7 \times 10^4 \cdot \frac{A \cdot B \cdot r \cdot \eta_D \cdot \cos^2 \bar{\theta}_2}{\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{F_y(\theta_2)}{(\ell_1 - r \cos \theta_1)^2} d\theta_1 \cdot \\
 &\quad \int_0^\infty \cos^2 \theta'_3 \cdot F'_A(x) \cdot F_x(\theta'_3) dx \tag{8}
 \end{aligned}$$

以上により、換算係数は、 η_D 、 $F_y(\theta_2)$ 、 $F_x(\theta_3)$ を実験的に求めることにより、⑧式を用いて求めることができる。

2.2 換算係数計算プログラム

2.1 に示した基礎式による換算係数計算プログラム「KKKP」のフローシートをFig. 6 に示す。

KKKPにおいては、個々の検出器の複数の γ 線エネルギーに対し、実験的に求めたコリメータ前面の水平面および垂直面での感度分布と、この時の線源強度より⑧式の η_D 、 $F_x(\theta_3)$ 、 $F_y(\theta_2)$ を求める。更にこの検出器と測定点の幾何学的形状、および測定点の周囲にあって γ 線に対し遮蔽となる物体の材質、寸法、密度から、その測定点に対する換算係数を各 γ 線エネルギーに対し計算する。その後数領域に分割した γ 線エネルギーに対し、最小自乗法を用いて、換算係数を γ 線エネルギーによる近似多項式として求める。

実験により求めた水平面、垂直面内での計数率を N_x 、 N_y (cps) とすると、コリメータ正面での計数率は $N_{x\theta_3=0}$ と $N_{y\theta_2=0}$ の幾何平均を用いてKKKPでは η_D 、 F_x 、 F_y を次のようにして求めている。

$$\eta_D = \frac{1}{3.7 \times 10^4 \cdot S \cdot Y_\gamma} \cdot \frac{4 \pi \ell_2^2}{A \cdot B} \cdot \sqrt{N_{x\theta_3=0} \cdot N_{y\theta_2=0}} \tag{9}$$

$$F_x(\theta_3) = \frac{N_x(\theta_3)}{\sqrt{N_{x\theta_3=0} \cdot N_{y\theta_2=0}}} \quad (10)$$

$$F_y(\theta_2) = \frac{N_y(\theta_2)}{\sqrt{N_{x\theta_3=0} \cdot N_{y\theta_2=0}}} \quad (11)$$

ここで

S_1 : 実験に用いた線源の強さ (μCi)

Y_γ : 1崩壊当りの γ 線放出割合

ℓ_2 : 線源-検出器中心間距離 (cm)

A,B : コリメータ窓の大きさ 縦 \times 横 (cm)

である。

実験により求める N_x , N_y は θ_3 , θ_2 がそれぞれ不連続の値であるが, KKKPにおいては直線内挿による近似を行っている。

⑧式における各積分は, 不等間隔離散点に対するシンプソン1/3則による数値積分により求めている。

2.3 検出器感度分布測定方法

測定はJMTB炉室B-2F, OGL-1計算機室に於いて, FP沈着測定に使用したと同一形状のコリメータを用いて行った。

検出器中心と線源の距離は, FP沈着測定時に最も多く使われている350mmで設定し, 横型, たて型コリメータに対し, 垂直, 水平のおのおの二方向について, 測定した。線源には, 他の標準線源と比較してFP沈着測定で, 検出されると思われる核種のエネルギー範囲に対し, 多くの γ 線ピークを有する点状の $^{152}\text{Eu} \cdot 10 \mu\text{Ci}$ を使用した。

垂直・水平方向のそれぞれの計数率の, 最も高い所を 0° として, プラス側・マイナス側とに分け, 計測はプラス側を主に測定した。マイナス側は, 正確な 0° を見つけるために 5° ぐらいまで測定し, それ以上はプラス側と対称とみなし, 省略した。また, 計数率の高い所の測定時間は統計誤差を考慮に入れて, 10800秒(3時間)とし, 計数率が低くなるにつれて測定時間を, 54000秒(15時間)または, 72000秒(20時間)とふやした。

垂直, 水平方向の設定角度内において, コリメータ窓以外から検出器に入射する γ 線については, コリメータを閉じた場合の測定を行い, 差を得ることにより補正した。

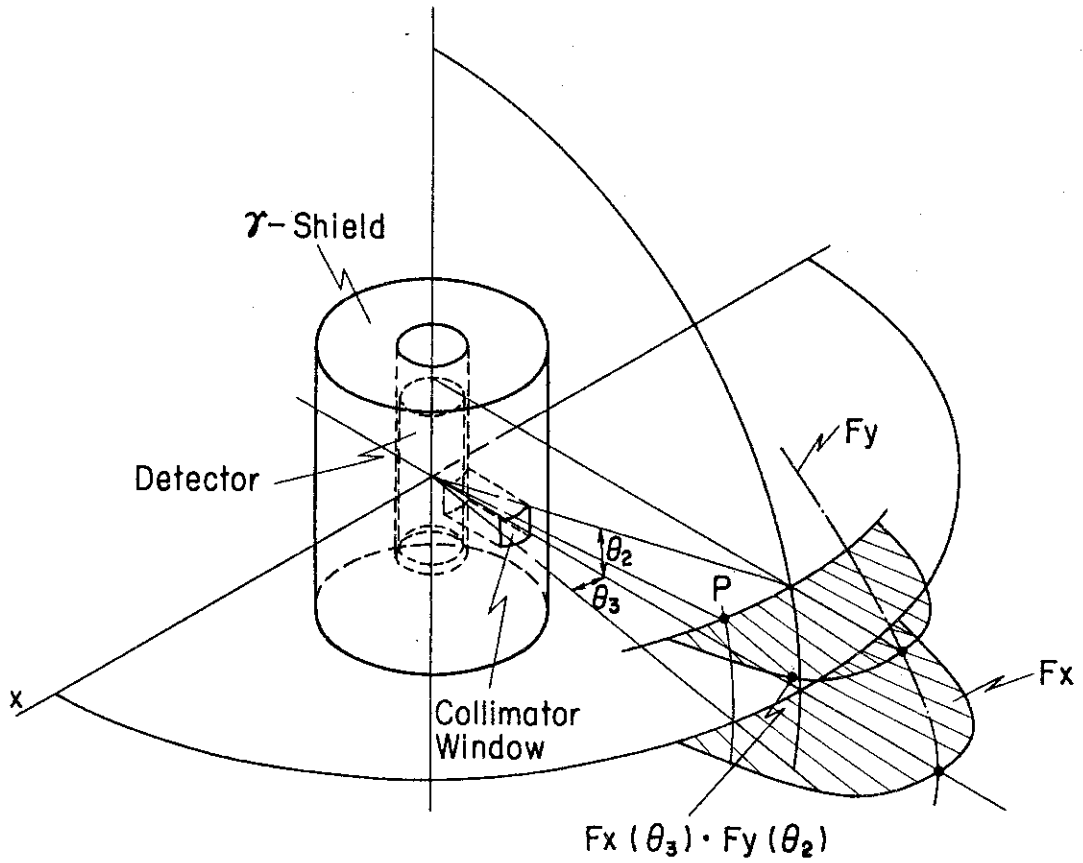


Fig. 3 Sensitivity of Ge - Detector in Shielding with a Collimator

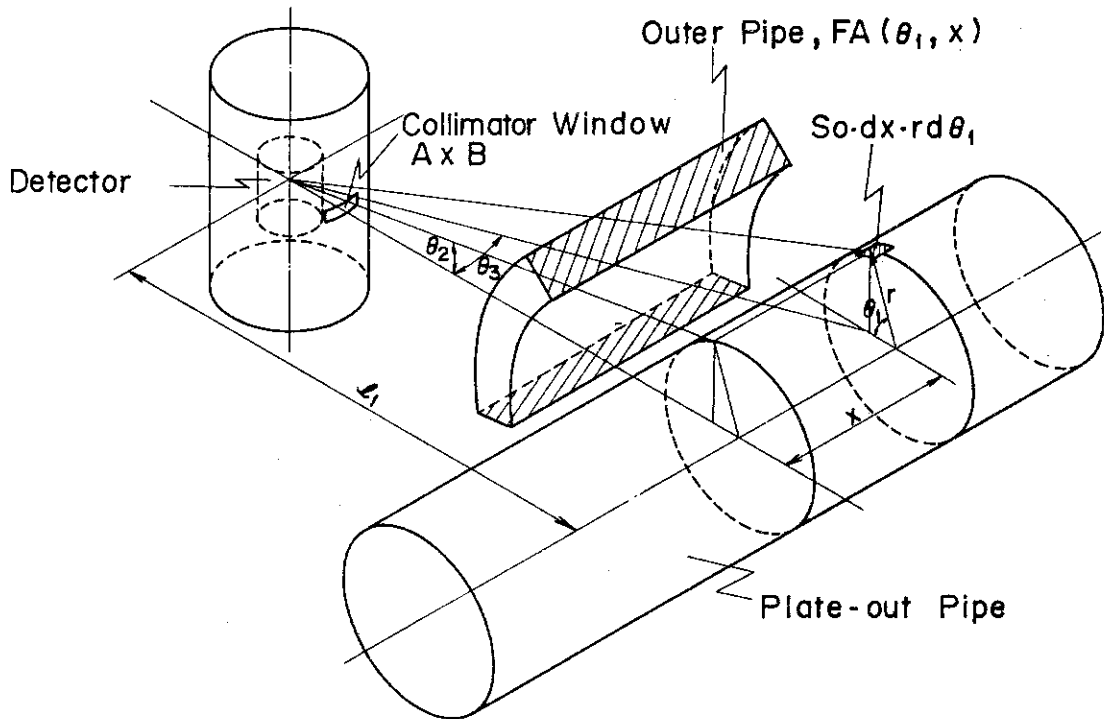


Fig. 4 Conversion Coefficient Calculation Model

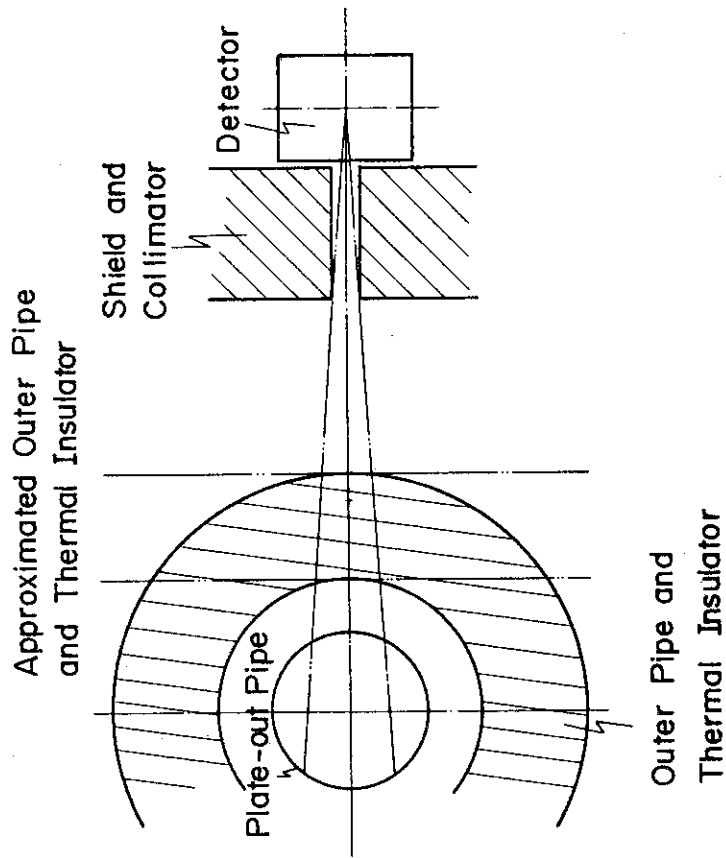


Fig. 5 Approximation of Outer Pipe and Thermal Insulator

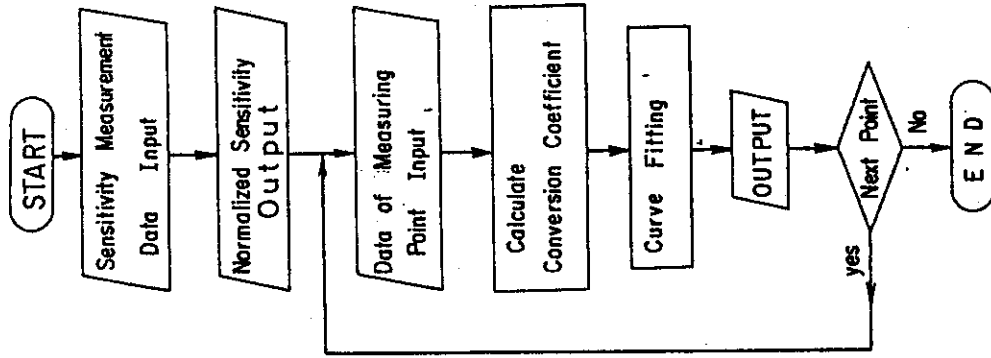


Fig. 6 Flow Diagram of KKKP

3. 結 果

3.1 検出器感度分布

2.3に示す方法で実施した各測定条件をTable 2~4に示す。検出された γ 線のうちTable 3に示す7本について以下のように感度分布の整理を行った。

各 γ 線のバックグラウンドを差し引いたネットエリアカウントを測定時間、放出分岐率及び線源強度で割ることにより計数効率(cps/(photon/s))を求める。この際、コリメータを閉じて同様に測定した時の計数率の補正を行い、正味の検出効率を求めたが、コリメータの鉛遮蔽体は充分厚く、 γ 線エネルギーの高い1407 keVの場合を除いて、測定結果にほとんど影響を与えなかった。

得られた各検出器の感度分布をFig. 7~18に示す。縦軸に計数効率、横軸にコリメータに対する線源の移動方向の角度をとり、各検出器の縦型、横型コリメータについて、それぞれ垂直、水平の2方向の感度分布を表した。尚、図中の破線は外挿値を示す。

各図における検出器、コリメータの組み合わせは次の通りである。

検出器とコリメータの組み合わせ

Fig. No.	検出器番号	コリメータ	測定方向
7	1	縦 型	垂 直
8	1	”	水 平
9	1	横 型	垂 直
10	1	”	水 平
11	2	縦 型	垂 直
12	2	”	水 平
13	2	横 型	垂 直
14	2	”	水 平
15	3	縦 型	垂 直
16	3	”	水 平
17	3	横 型	垂 直
18	3	”	水 平

3.2 換算係数

それぞれの検出器の換算係数を Fig. 19~39 に示す。たて軸に単位時間，単位面積，1 壊変数当りの計数率，横軸に γ 線エネルギーをとり，各検出器の 13 の測定点におけるそれぞれの換算係数を，見易くするために分けて示した。

Eu-152 による検出器感度分布の測定では，エネルギーの低い 122 keV と 244 keV の間に適当な γ 線が無く，一方換算係数は，このエネルギーの付近で大きく変化するので，適当な内挿が必要となった。今回用いた内挿の方法は次のようなものである。

Fig. 40 の例に示すように，たて軸に計数率，横軸に γ 線エネルギーをとり，各角度の計数率をプロットすると，検出器，コリメータのいずれの組合わせにおいても良い直線関係が得られる。したがって，各組合わせに対し，Fig. 40 と同様の図を作成し，160 keV および 200 keV の計数率を直線内挿により求めて，KKKP により換算係数を求めた。

Table 2 Sensitivity Measurement Condition No.1 Detec.

Collimator	Direction	Angle (Deg.)	Counting Time	Date
Blind	-	0	7 2 0 0 0 sec	1 9 7 9. 9. 2 1
	H	+ 1 0. 0	7 2 0 0 0	9. 2 5
	H	+ 2 0. 0	7 2 0 0 0	9. 2 6
	H	+ 3 0. 0	7 2 0 0 0	9. 2 7
	V	+ 1 0. 0	7 2 0 0 0	9. 2 8
	V	+ 2 0. 0	7 2 0 0 0	1 0. 1
	V	+ 3 0. 0	7 2 0 0 0	1 0. 2
	V	+ 4 0. 0	7 2 0 0 0	1 0. 3
V	-	0	1 0 8 0 0	1 9 7 9. 1 0. 4
	H	+ 0. 5	1 0 8 0 0	1 1. 6
	H	+ 1. 0	1 0 8 0 0	1 1. 1
	H	+ 1. 5	1 0 8 0 0	1 1. 2
	H	+ 2. 0	7 2 0 0 0	1 1. 1 3
	H	+ 2. 5	7 2 0 0 0	1 1. 1
	H	+ 3. 0	7 2 0 0 0	1 1. 3 1
	H	+ 4. 0	7 2 0 0 0	1 0. 2 9
	H	+ 5. 0	7 2 0 0 0	1 0. 2 6
	H	+ 7. 0	7 2 0 0 0	1 0. 2 7
	H	+ 1 0. 0	7 2 0 0 0	1 0. 2 8
	H	- 0. 5	7 2 0 0 0	1 1. 7
	H	- 1. 0	7 2 0 0 0	1 1. 5
	H	- 2. 0	7 2 0 0 0	1 1. 1 3
	H	- 4. 0	7 2 0 0 0	1 1. 1 4
	V	+ 2. 0	1 0 8 0 0	1 9 7 9. 1 0. 8
	V	+ 4. 0	1 0 8 0 0	1 0. 2 9
	V	+ 6. 0	1 0 8 0 0	1 0. 9
	V	+ 8. 0	1 0 8 0 0	1 0. 1 1
	V	+ 1 0. 0	7 2 0 0 0	1 0. 9
V	+ 1 2. 0	1 0 8 0 0	1 0. 1 1	

H ; Horizontal

V ; Vertical

JAERI-M 9593

Collimator	Direction	Angle (Deg.)	Counting Time	Date
V	V	+ 14.0	1 4 4 0 0 sec	1 9 7 9. 1 0. 1 2
	V	+ 16.0	5 7 6 0 0	1 0. 1 2
	V	+ 18.0	6 1 2 0 0	1 0. 1 1
	V	+ 20.0	7 2 0 0 0	1 0. 8
	V	+ 30.0	7 2 0 0 0	1 0. 5
	V	+ 40.0	7 2 0 0 0	1 0. 4
	V	- 4.0	1 0 8 0 0	1 1. 1 3
H	-	0	1 0 8 0 0	1 9 7 9. 1 0. 2 3
	H	+ 1.0	1 0 8 0 0	1 0. 1 5
	H	+ 2.0	1 0 8 0 0	1 0. 1 3
	H	+ 3.0	1 0 8 0 0	1 0. 1 5
	H	+ 5.0	1 0 8 0 0	1 0. 1 7
	H	+ 7.0	7 2 0 0 0	1 0. 2 5
	H	+ 10.0	7 2 0 0 0	1 0. 1 6
	H	+ 15.0	7 2 0 0 0	1 0. 1 7
	H	+ 20.0	7 2 0 0 0	1 0. 1 5
	H	+ 25.0	7 2 0 0 0	1 0. 1 8
	H	+ 30.0	7 2 0 0 0	1 0. 1 3
	H	- 1.0	3 6 0 0 0	1 1. 1 2
	H	- 2.0	1 0 8 0 0	1 1. 1 1
	H	- 4.0	1 0 8 0 0	1 1. 1 2
	H	- 6.0	1 0 8 0 0	1 1. 1 3
	V	+ 1.0	1 0 8 0 0	1 9 7 9. 1 1. 1 2
	V	+ 2.0	7 2 0 0 0	1 1. 9
	V	+ 3.0	7 2 0 0 0	1 1. 8
	V	+ 5.0	7 2 0 0 0	1 0. 2 2
	V	+ 7.0	7 2 0 0 0	1 0. 2 3
V	+ 10.0	7 2 0 0 0	1 0. 2 4	
V	- 0.5	1 0 8 0 0	1 1. 7	
V	- 1.0	1 0 8 0 0	1 1. 1 0	
V	- 2.0	7 2 0 0 0	1 1. 1 0	

Table 3 Sensitivity Measurement Condition No. 2 Detec.

Collimator	Direction	Angle (Deg.)	Counting Time	Date
Blind	—	0	7 2 0 0 0 sec	1 9 8 0. 1. 1 9
	H	+ 5.0	7 2 0 0 0	1. 2 1
	H	- 5.0	7 2 0 0 0	1. 2 2
	V	+ 5.0	7 2 0 0 0	1. 2 3
V	—	0	1 0 8 0 0	1 9 7 9. 1 1. 2 7
	H	+ 0.5	1 0 8 0 0	1 1. 2 2
	H	+ 1.0	1 0 8 0 0	1 1. 2 2
	H	+ 2.0	7 2 0 0 0	1 1. 2 2
	H	+ 3.0	5 4 0 0 0	1 1. 3 0
	H	+ 4.0	7 2 0 0 0	1 1. 2 4
	H	+ 5.0	7 2 0 0 0	1 1. 2 5
	H	+ 6.0	7 2 0 0 0	1 1. 2 6
	H	- 0.5	1 0 8 0 0	1 1. 2 7
	H	- 1.0	1 0 8 0 0	1 1. 2 8
	H	- 2.0	5 4 0 0 0	1 1. 2 1
	H	- 3.0	7 2 0 0 0	1 1. 2 8
	H	- 4.0	7 2 0 0 0	1 1. 2 7
	V	+ 1.0	1 0 8 0 0	1 9 7 9. 1 2. 3
	V	+ 2.0	1 0 8 0 0	1 2. 4
	V	+ 4.0	1 0 8 0 0	1 2. 7
	V	+ 5.0	5 4 0 0 0	1 9 8 0. 1. 1 8
	V	+ 6.0	1 0 8 0 0	1 9 7 9. 1 2. 7
	V	+ 7.0	7 2 0 0 0	1 2. 3
	V	+ 8.0	7 2 0 0 0	1 2. 4
	V	+ 9.0	7 2 0 0 0	1 2. 5
	V	+ 10.0	5 4 0 0 0	1 2. 6
	V	- 2.0	1 0 8 0 0	1 9 8 0. 1. 1 7
	V	- 3.0	1 0 8 0 0	1. 1 8
V	- 4.0	5 4 0 0 0	1. 1 7	

H ; Horizontal

V ; Vertical

Collimator	Direction	Angle (Deg.)	Counting Time	Date
V	H	- 6.0	7 2000 sec	1980. 1. 16
H	-	0	10800	1980. 4. 25
	H	+ 1.0	10800	4. 25
	H	+ 2.0	10800	3. 11
	H	+ 3.0	10800	3. 17
	H	+ 4.0	10800	3. 12
	H	+ 6.0	10800	3. 18
	H	+ 8.0	10800	3. 25
	H	+ 10.0	54000	3. 13
	H	+ 11.0	54000	5. 6
	H	+ 15.0	54000	5. 1
	H	- 1.0	10800	5. 2
	H	- 2.0	10800	3. 12
	H	- 3.0	10800	4. 30
	H	- 4.0	10800	3. 18
	H	- 6.0	54000	4. 26
	H	- 8.0	54000	4. 30
	V	+ 1.0	10800	1980. 3. 10
	V	+ 2.0	54000	3. 7
	V	+ 3.0	54000	3. 8
	V	+ 4.0	54000	3. 17
	V	+ 5.0	54000	5. 28
	V	+ 6.0	54000	3. 25
	V	+ 7.0	54000	5. 24
V	+ 8.0	54000	5. 26	
V	- 1.0	10800	3. 11	
V	- 2.0	54000	3. 12	
V	- 3.0	54000	5. 19	
V	- 4.0	54000	5. 20	
V	- 5.0	54000	5. 21	

Table 4 Sensitivity Measurement Condition No.3 Detec.

Collimator	Direction	Angle (Deg.)	Counting Time	Date
Blind	—	0	5 4 0 0 0 sec	1 9 8 0. 8. 1 2
	H	+ 5.0	5 4 0 0 0	6. 2 7
	H	+ 10.0	5 4 0 0 0	7. 2
	H	— 5.0	5 4 0 0 0	7. 1
	V	+ 5.0	5 4 0 0 0	7. 1 2
	V	+ 10.0	5 4 0 0 0	7. 1 1
	V	+ 25.0	5 4 0 0 0	9. 1
	V	— 5.0	5 4 0 0 0	7. 1 4
	V	— 10.0	5 4 0 0 0	7. 3
V	—	0	1 0 8 0 0	1 9 8 0. 7. 1 4
	H	+ 1.0	1 0 8 0 0	7. 1 7
	H	+ 2.0	5 4 0 0 0	7. 1 7
	H	+ 3.0	5 4 0 0 0	7. 2 2
	H	+ 4.0	5 4 0 0 0	7. 2 1
	H	+ 5.0	5 4 0 0 0	7. 2 6
	H	+ 6.0	5 4 0 0 0	7. 2 8
	H	+ 7.0	5 4 0 0 0	7. 2 9
	H	+ 8.0	5 4 0 0 0	7. 3 0
	H	+ 10.0	5 4 0 0 0	7. 3 1
	H	+ 11.0	5 4 0 0 0	8. 4
	H	+ 15.0	5 4 0 0 0	8. 5
	H	— 1.0	1 0 8 0 0	7. 1 5
	H	— 2.0	5 4 0 0 0	7. 1 5
	H	— 3.0	5 4 0 0 0	7. 1 6
	H	— 4.0	5 4 0 0 0	7. 2 3
	H	— 5.0	5 4 0 0 0	7. 2 4
	H	— 6.0	5 4 0 0 0	7. 2 5
	V	+ 1.0	1 0 8 0 0	7. 1 4
	V	+ 2.0	1 0 8 0 0	7. 9
	V	+ 3.0	1 0 8 0 0	7. 4
	V	+ 4.0	1 0 8 0 0	7. 7
	V	+ 6.0	5 4 0 0 0	7. 7
	V	+ 8.0	5 4 0 0 0	7. 9
	V	+ 10.0	5 4 0 0 0	7. 1 0
	V	+ 11.0	5 4 0 0 0	8. 6
	V	+ 13.0	5 4 0 0 0	8. 9
V	+ 14.0	5 4 0 0 0	8. 1 1	
V	+ 15.0	5 4 0 0 0	8. 7	
V	+ 20.0	5 4 0 0 0	8. 8	
V	— 1.0	1 0 8 0 0	7. 2	

H ; Horizontal

V ; Vertical

JAERI-M 9593

Collimator	Direction	Angle (Deg.)	Counting Time	Date
V	V	- 2.0	1 0 8 0 0 sec	1 9 8 0. 7. 2
	V	- 3.0	1 0 8 0 0	7. 4
	V	- 4.0	1 0 8 0 0	7. 8
	V	- 6.0	5 4 0 0 0	7. 8
H	-	0	1 0 8 0 0	1 9 8 0. 8. 13
	V	+ 1.0	1 0 8 0 0	8. 14
	V	+ 2.0	1 0 8 0 0	8. 19
	V	+ 3.0	1 0 8 0 0	8. 18
	V	+ 4.0	1 0 8 0 0	8. 15
	V	+ 5.0	5 4 0 0 0	8. 20
	V	+ 6.0	5 4 0 0 0	8. 21
	V	+ 7.0	5 4 0 0 0	8. 22
	V	+ 8.0	5 4 0 0 0	8. 23
	V	+ 9.0	5 4 0 0 0	8. 25
	V	+ 10.0	5 4 0 0 0	8. 19
	V	+ 11.0	5 4 0 0 0	8. 14
	V	+ 12.0	5 4 0 0 0	8. 28
	V	+ 13.0	5 4 0 0 0	8. 26
	H	H	+ 15.0	5 4 0 0 0
H		+ 20.0	5 4 0 0 0	8. 18
H		+ 25.0	5 4 0 0 0	8. 27
H		- 1.0	1 0 8 0 0	8. 20
H		- 2.0	1 0 8 0 0	8. 27
H		- 3.0	1 0 8 0 0	8. 22
H		- 4.0	1 0 8 0 0	8. 25
H		- 5.0	1 0 8 0 0	8. 26
V	V	+ 0.5	1 0 8 0 0	1 9 8 0. 9. 2
	V	+ 1.0	1 0 8 0 0	9. 3
	V	+ 2.0	5 4 0 0 0	9. 2
	V	+ 3.0	5 4 0 0 0	9. 3
	V	+ 4.0	5 4 0 0 0	9. 9
	V	+ 5.0	5 4 0 0 0	9. 10
	V	+ 6.0	5 4 0 0 0	9. 11
	V	+ 8.0	5 4 0 0 0	9. 16
	V	+ 10.0	5 4 0 0 0	9. 17
	V	+ 15.0	5 4 0 0 0	9. 18
	V	- 0.5	1 0 8 0 0	9. 4
	V	- 1.0	1 0 8 0 0	9. 5
	V	- 2.0	5 4 0 0 0	9. 4
	V	- 3.0	5 4 0 0 0	9. 8
	V	- 4.0	5 4 0 0 0	9. 22
V	- 5.0	5 4 0 0 0	9. 24	

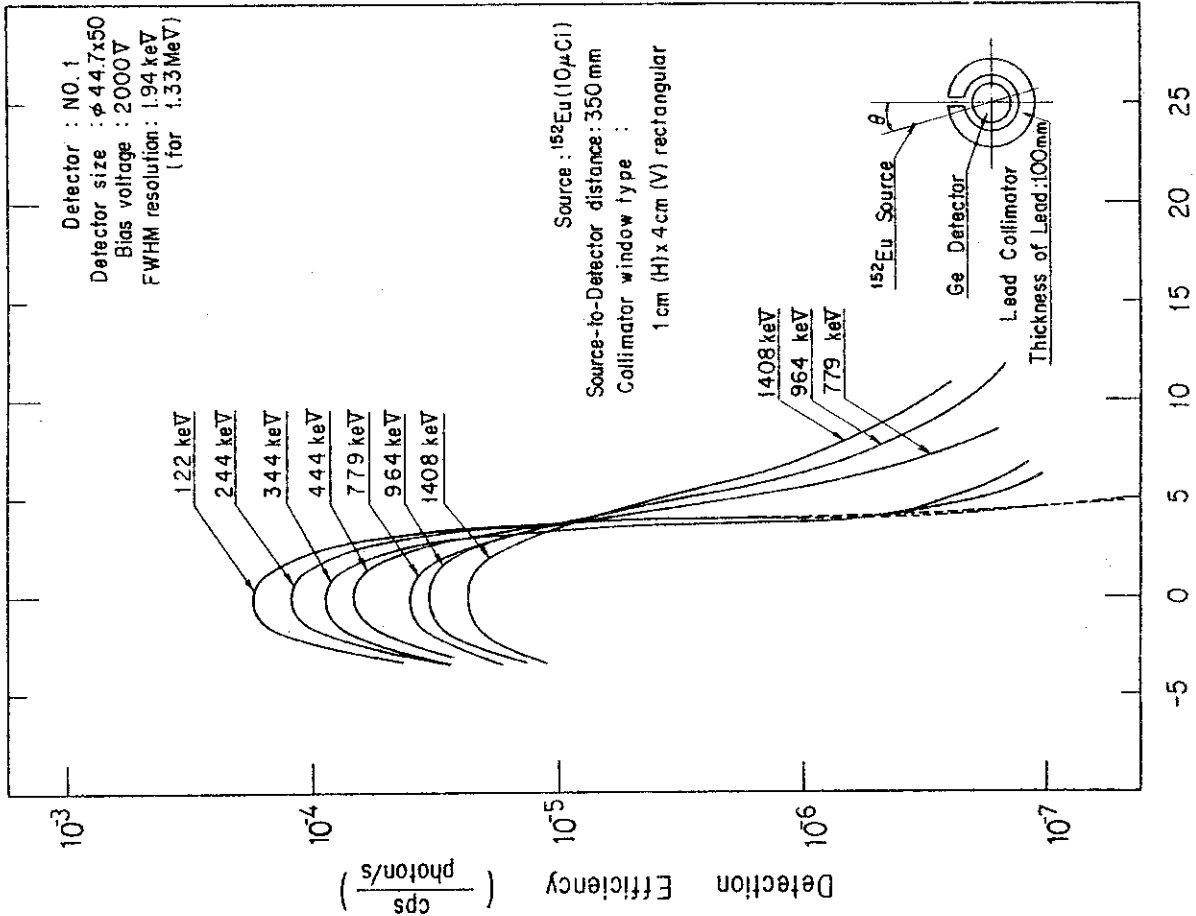


Fig.8 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
 Horizontal Direction Characteristics of a Ge Detector;
 with a Lead Vertical Collimator.

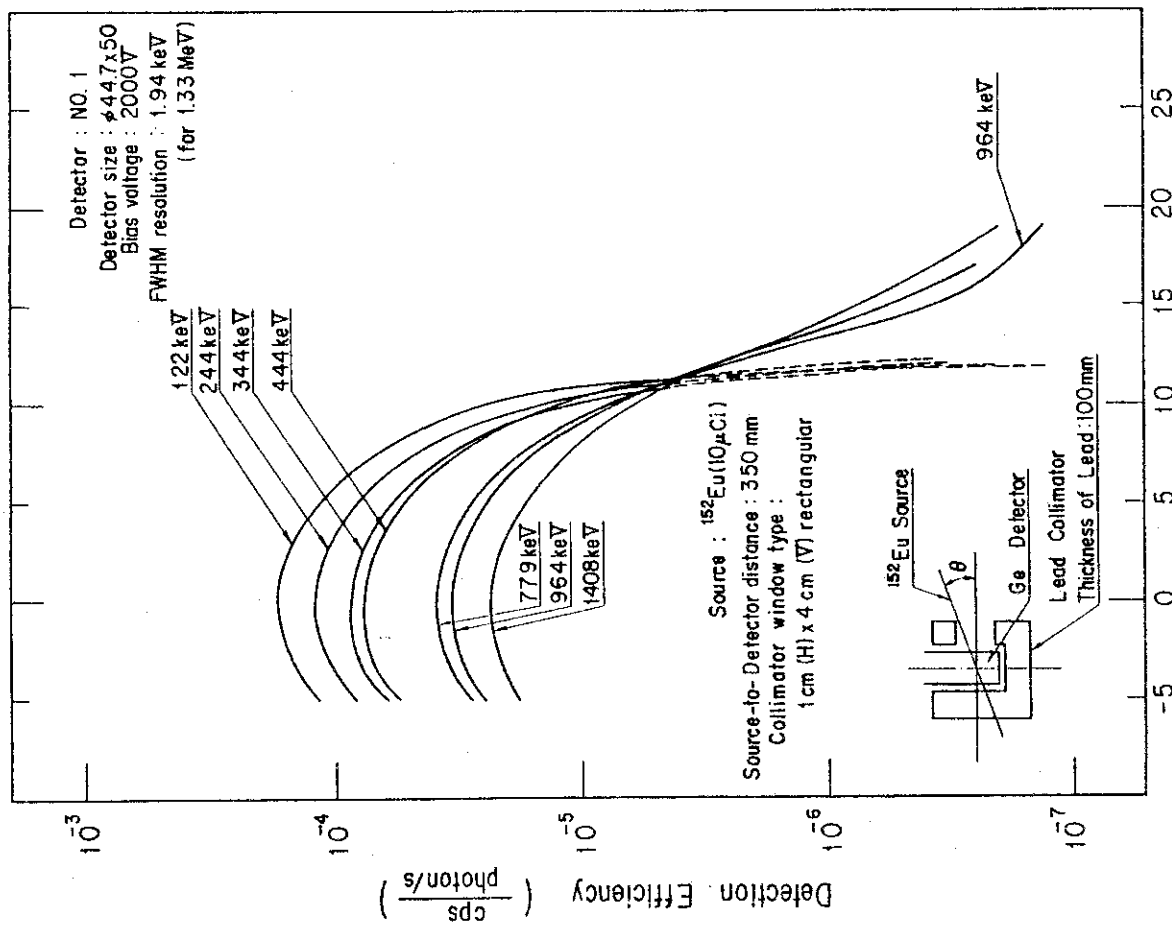


Fig.7 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
 Vertical Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Vertical Collimator.

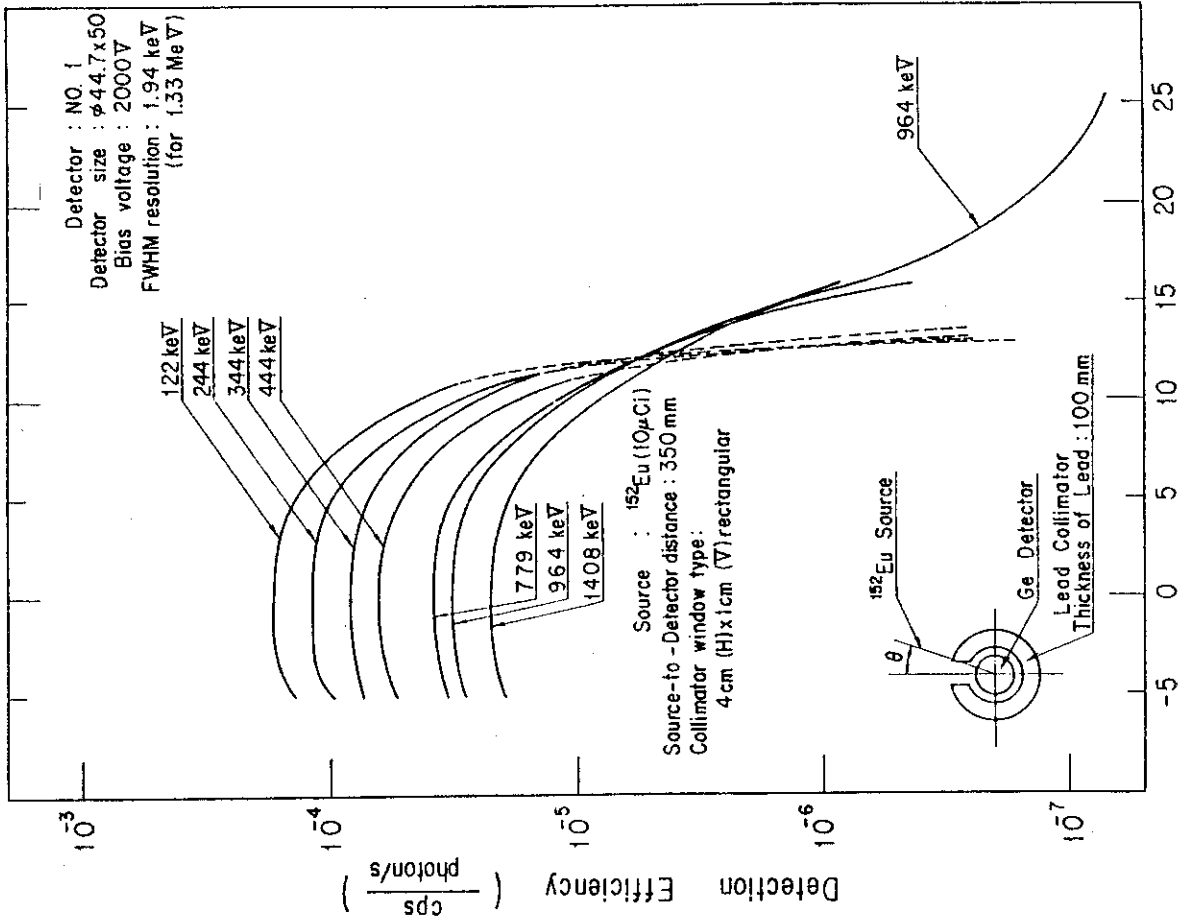


Fig.10 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
 Horizontal Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Horizontal Collimator.

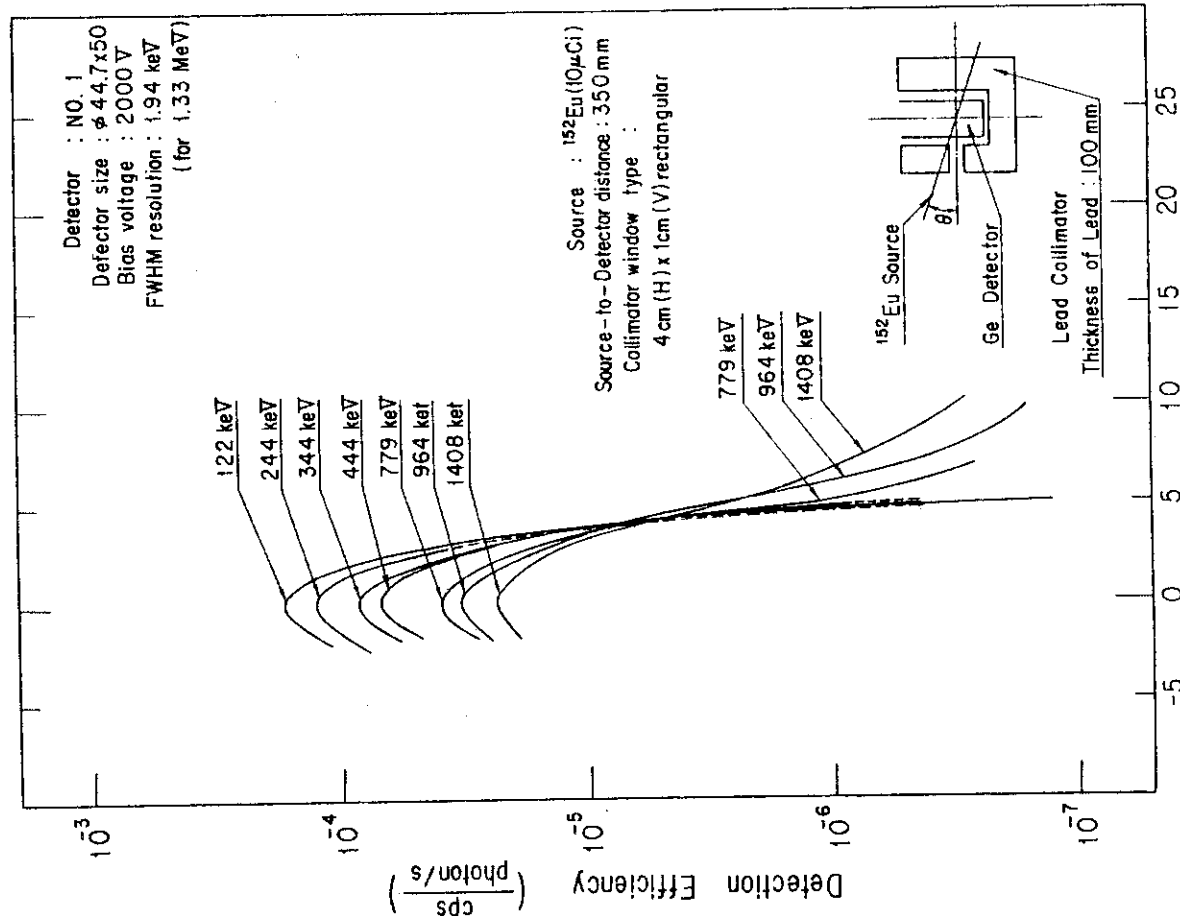


Fig.9 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
 Vertical Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Horizontal Collimator.

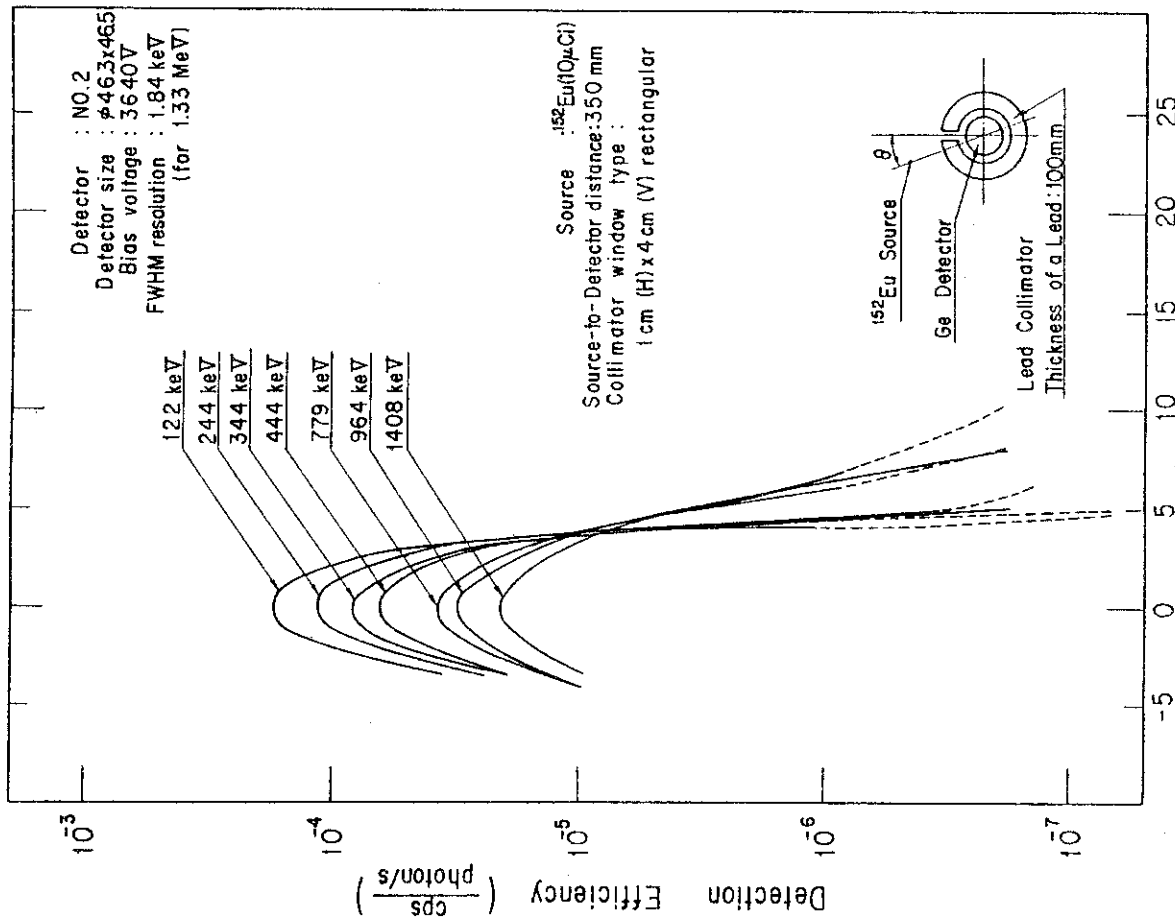


Fig.12 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
Horizontal Direction Characteristics of a Ge Detector
with a Lead Vertical Collimator.

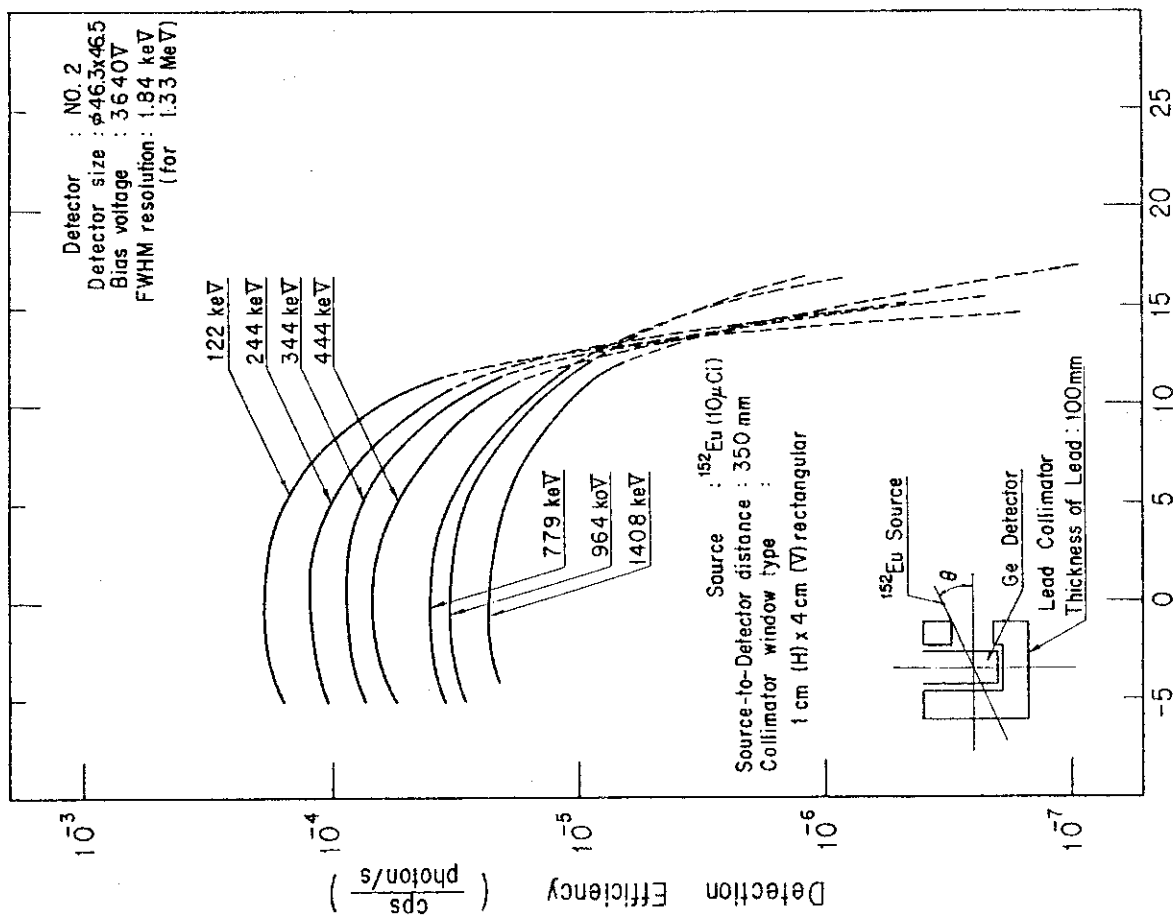


Fig.11 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
Vertical Direction Characteristics of a Ge Detector
with a Lead Vertical Collimator.

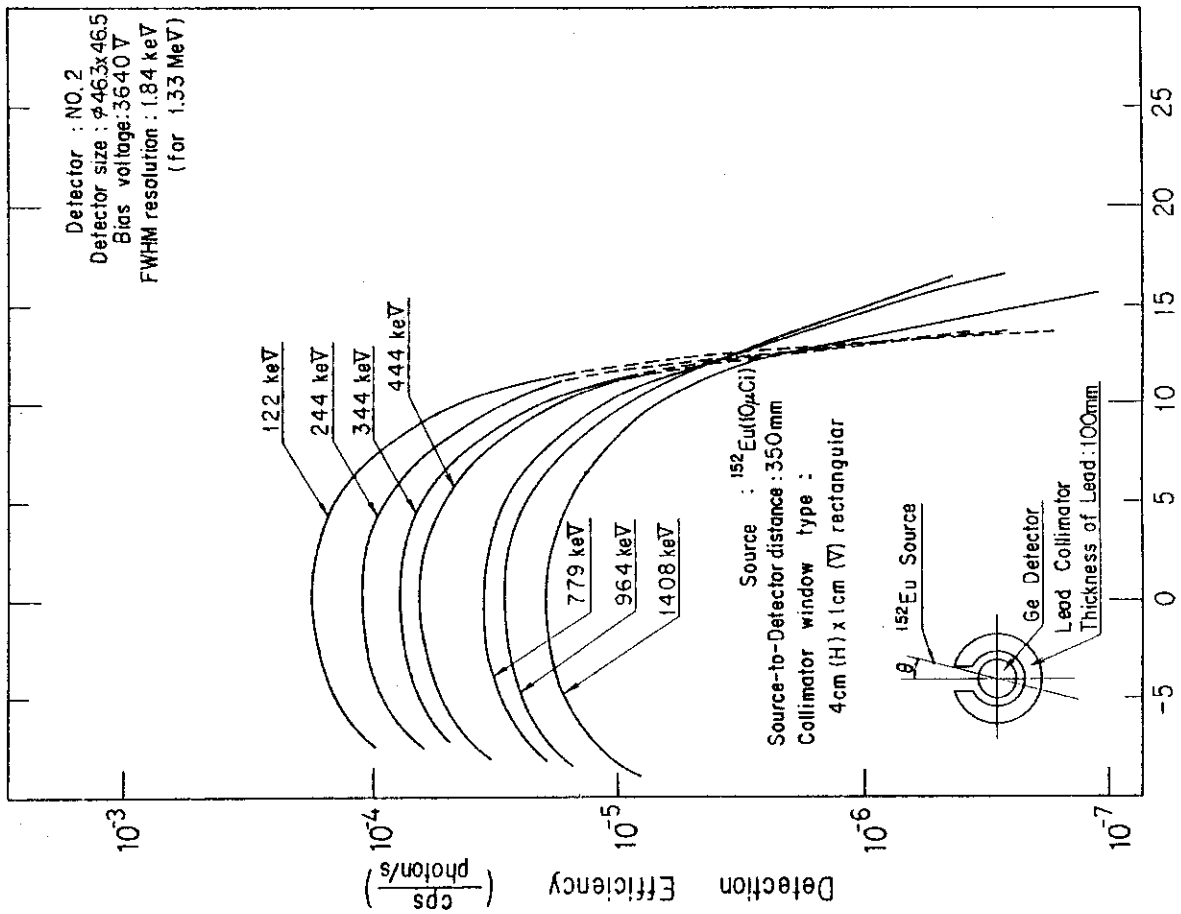


Fig.14 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
 Horizontal Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Horizontal Collimator.

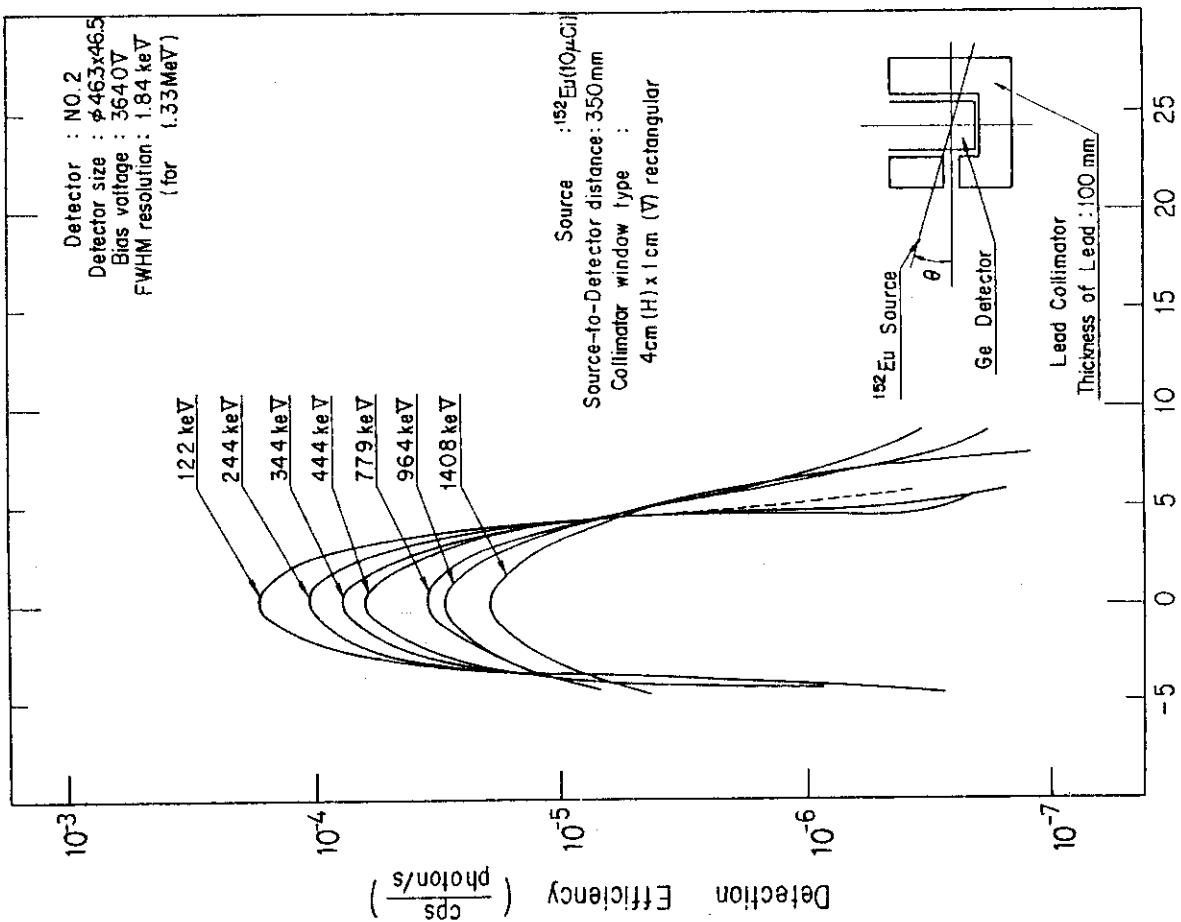


Fig.13 Gamma-ray incident angle, θ (deg)
 Vertical Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Horizontal Collimator.

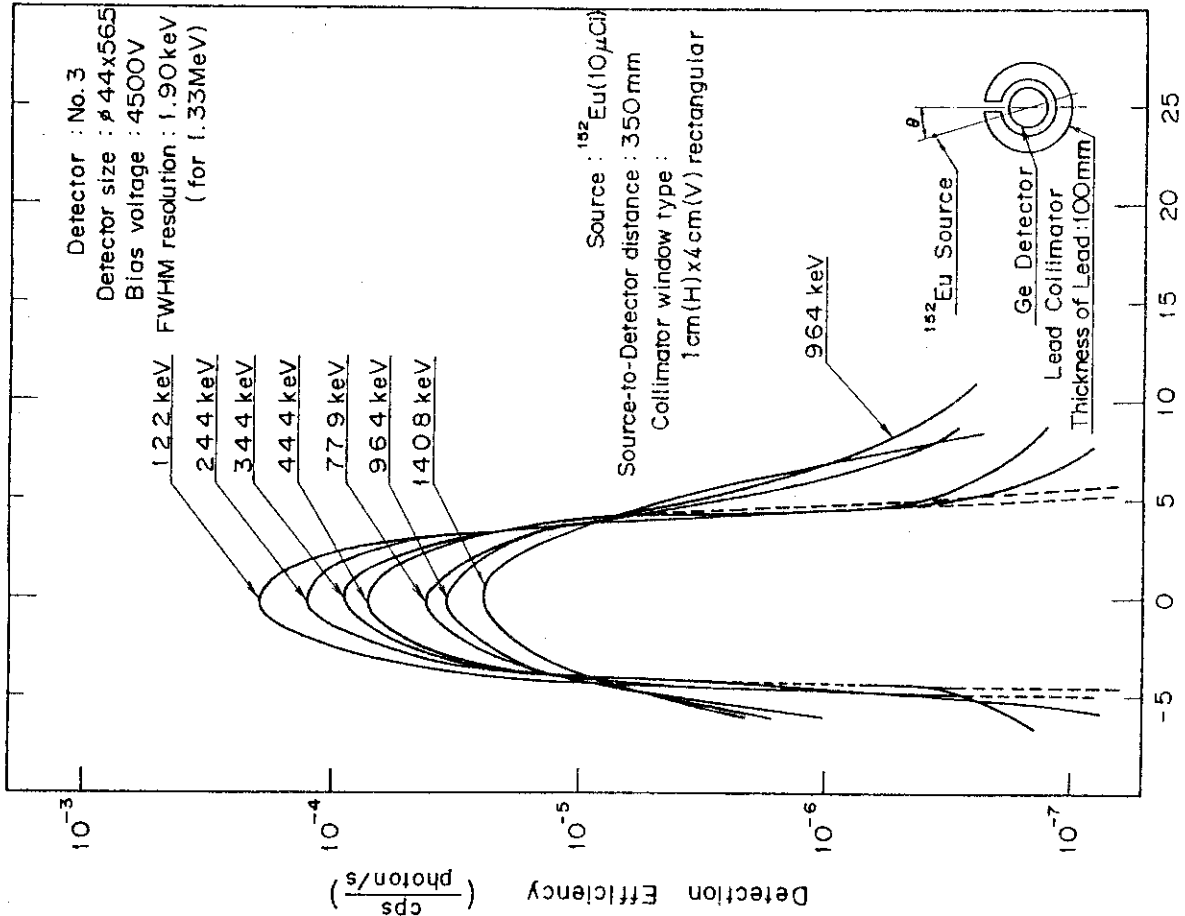


Fig.16 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
 Horizontal Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Vertical Collimator.

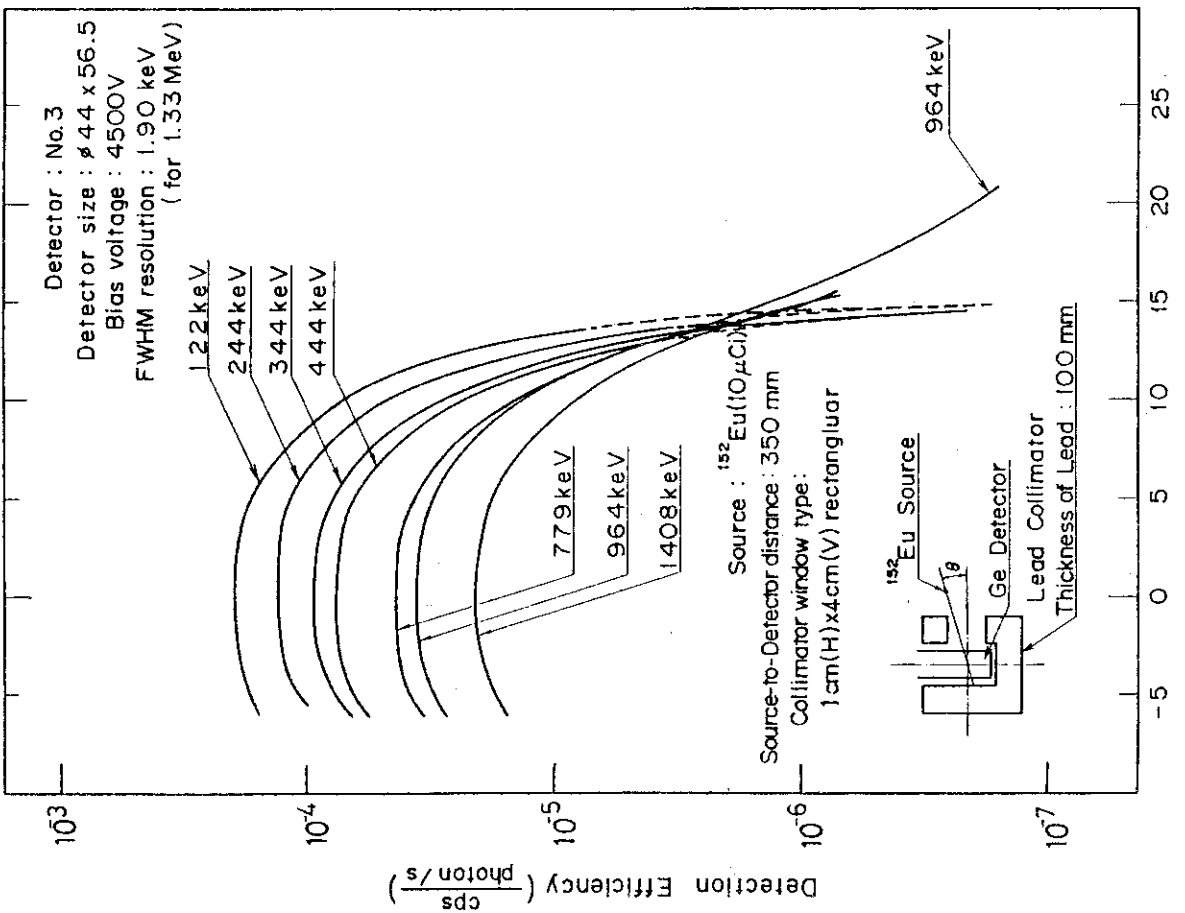


Fig.15 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
 Vertical Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Vertical Collimator.

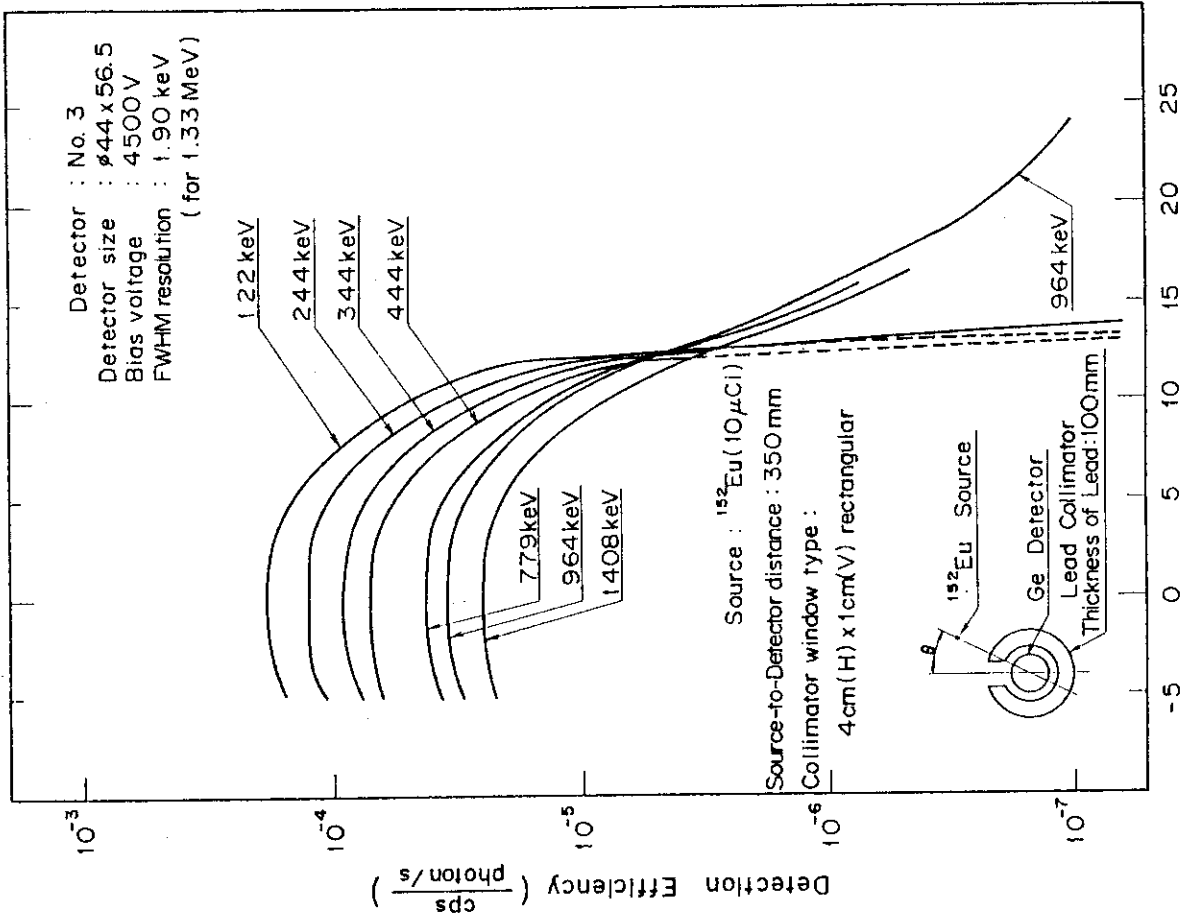


Fig.18 Gamma-ray incident angle, θ (deg.)
 Horizontal Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Horizontal Collimator.

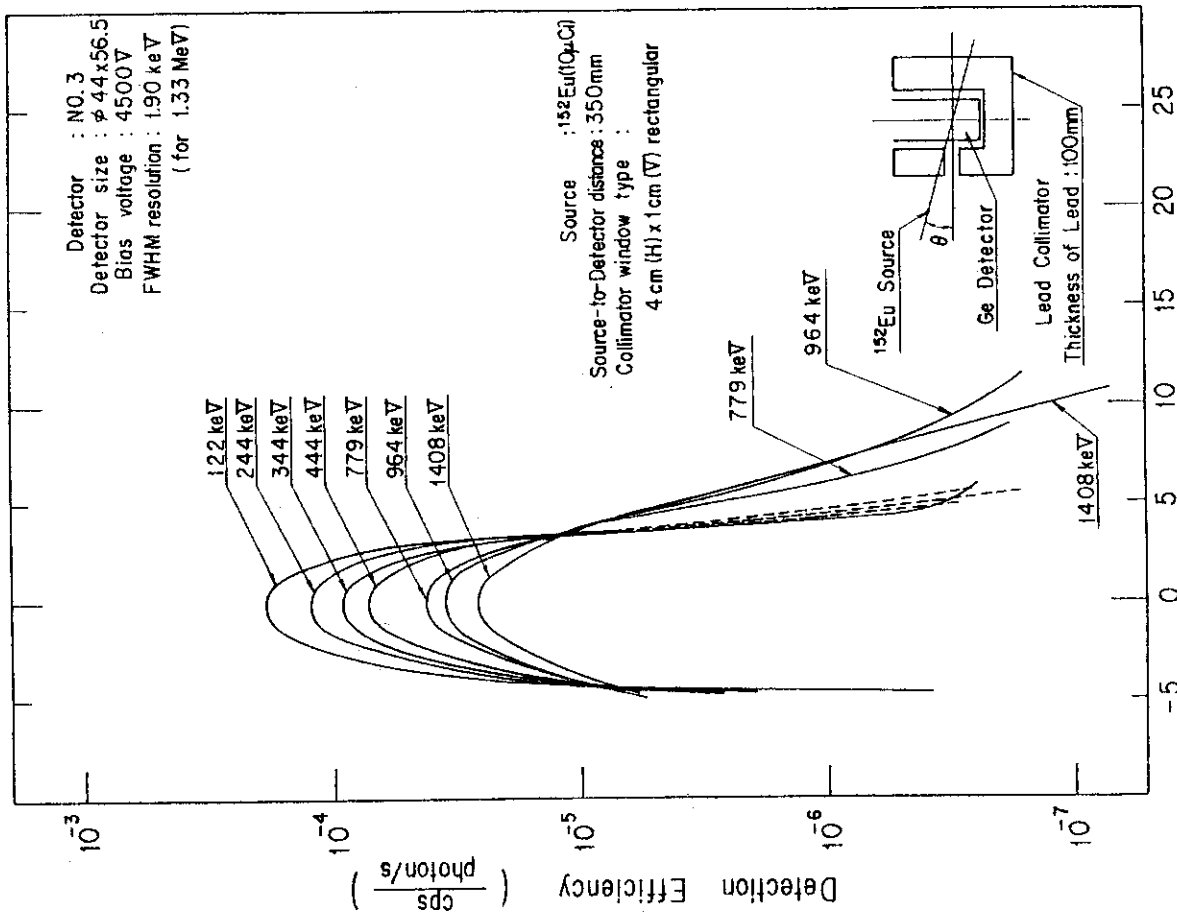


Fig.17 Gamma-ray incident angle, θ (deg)
 Vertical Direction Characteristics of a Ge Detector
 with a Lead Horizontal Collimator.

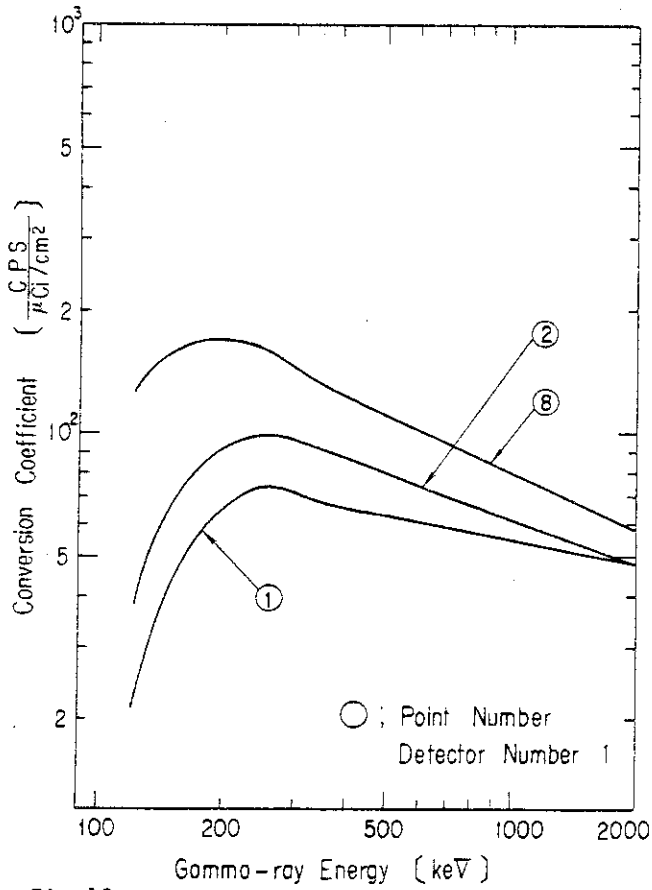


Fig. 19
Conversion Coefficient of Detector Number 1

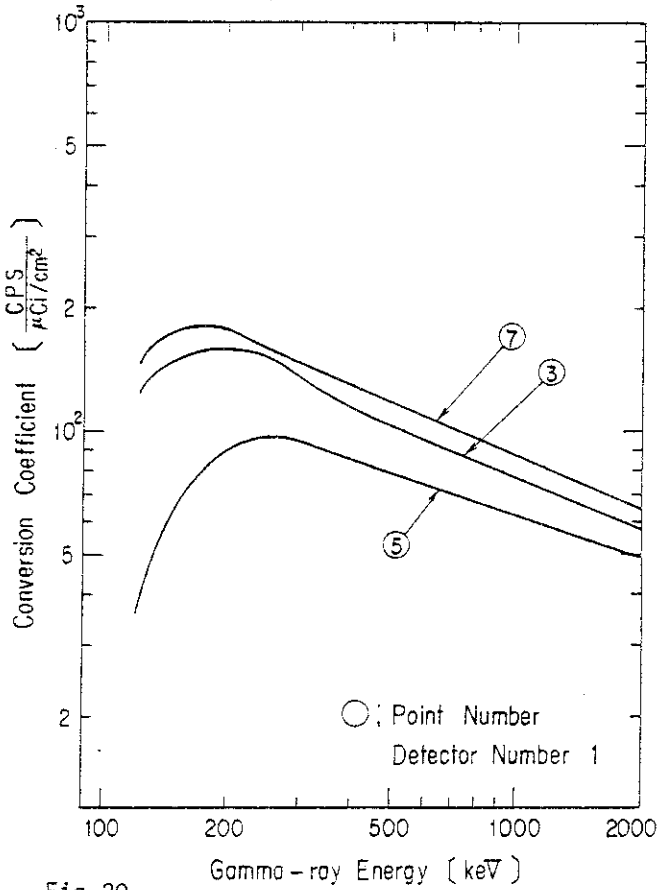


Fig. 20
Conversion Coefficient of Detector Number 1

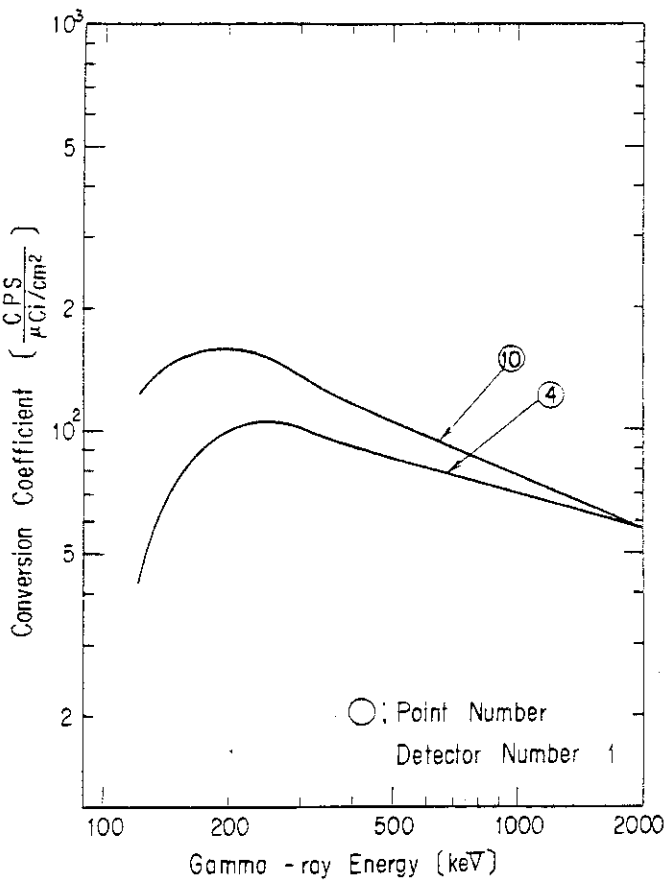


Fig. 21
Conversion Coefficient of Detector Number 1

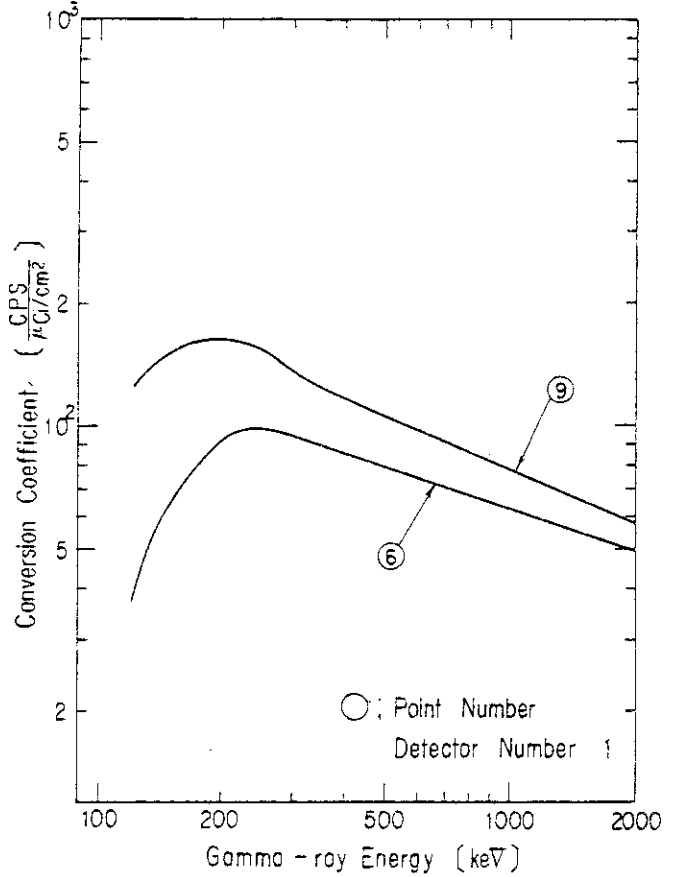


Fig. 22
Conversion Coefficient of Detector Number 1

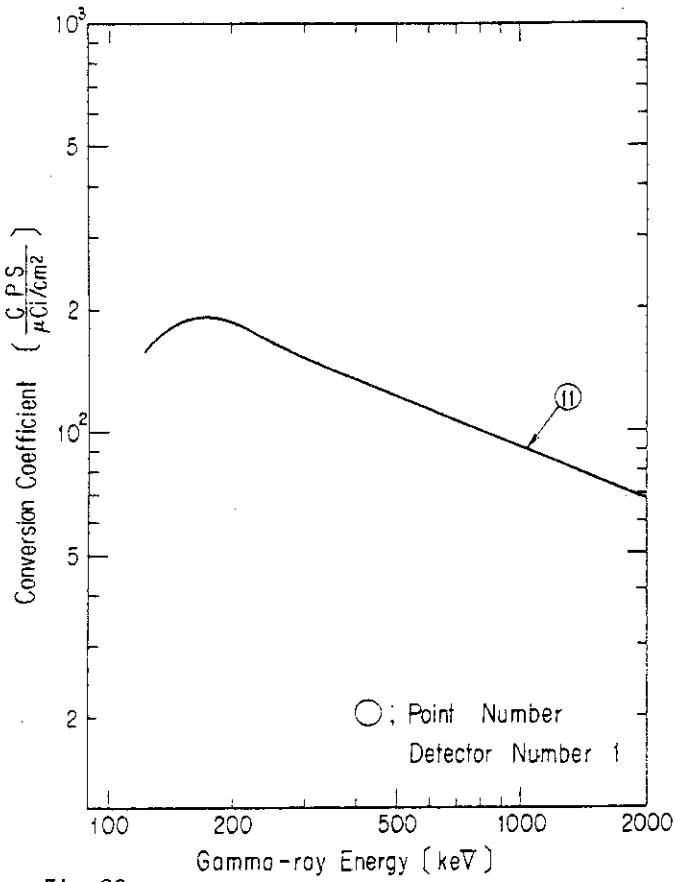


Fig. 23
Conversion Coefficient of Detector Number 1

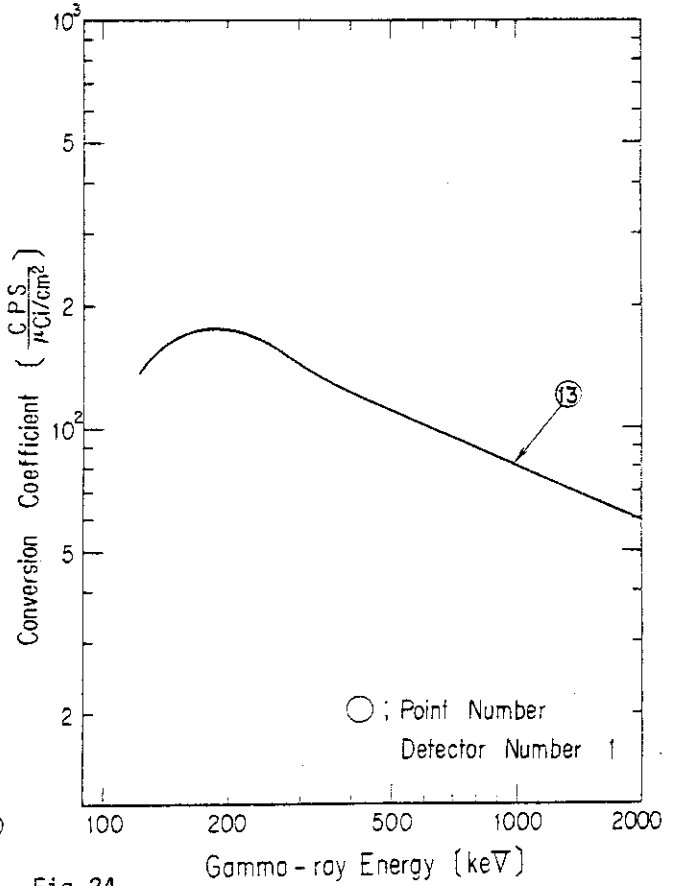


Fig. 24
Conversion Coefficient of Detector Number 1

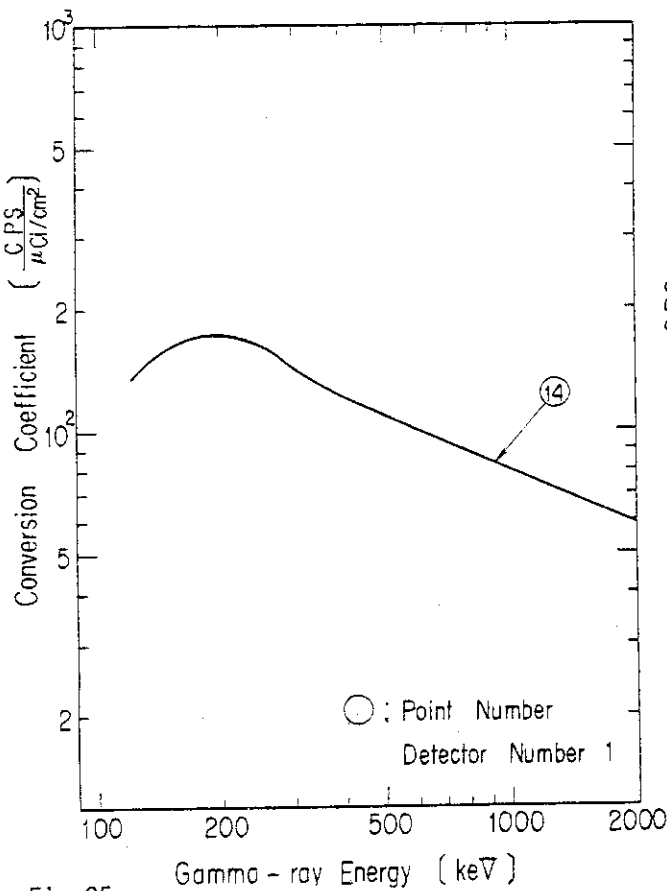


Fig. 25
Conversion Coefficient of Detector Number 1

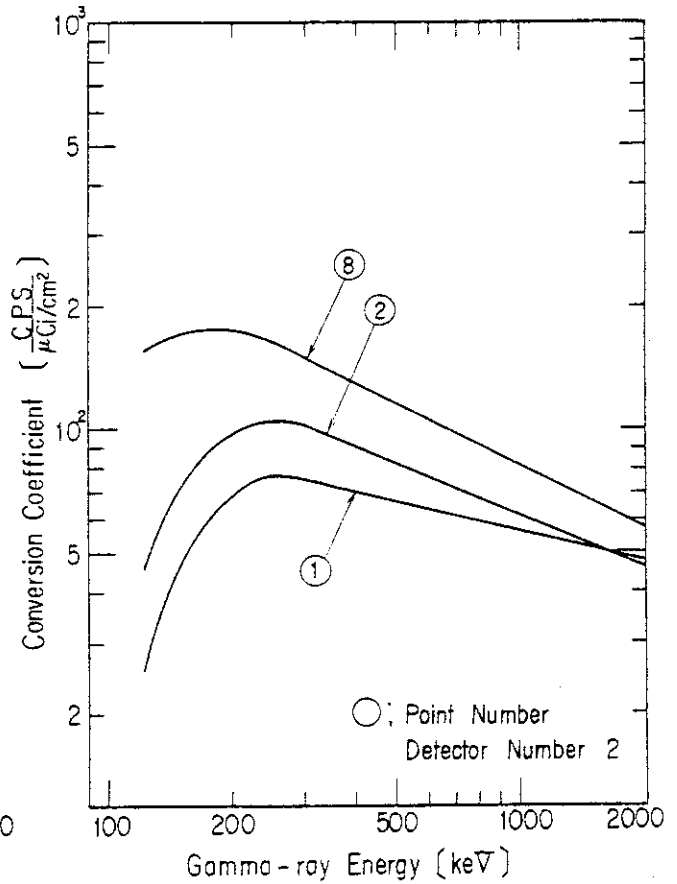


Fig. 26
Conversion Coefficient of Detector Number 2

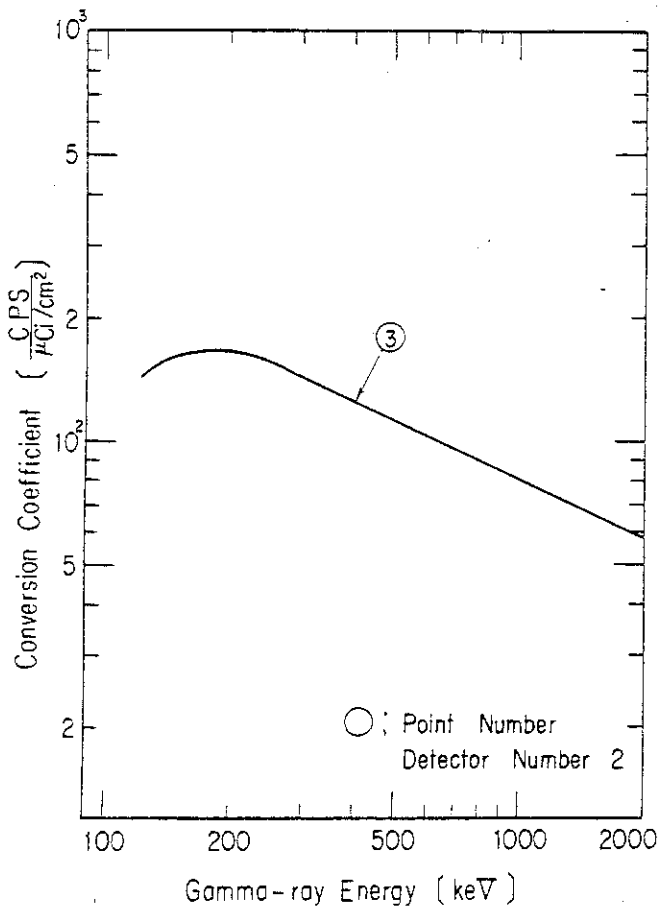


Fig. 27
Conversion Coefficient of Detector Number 2

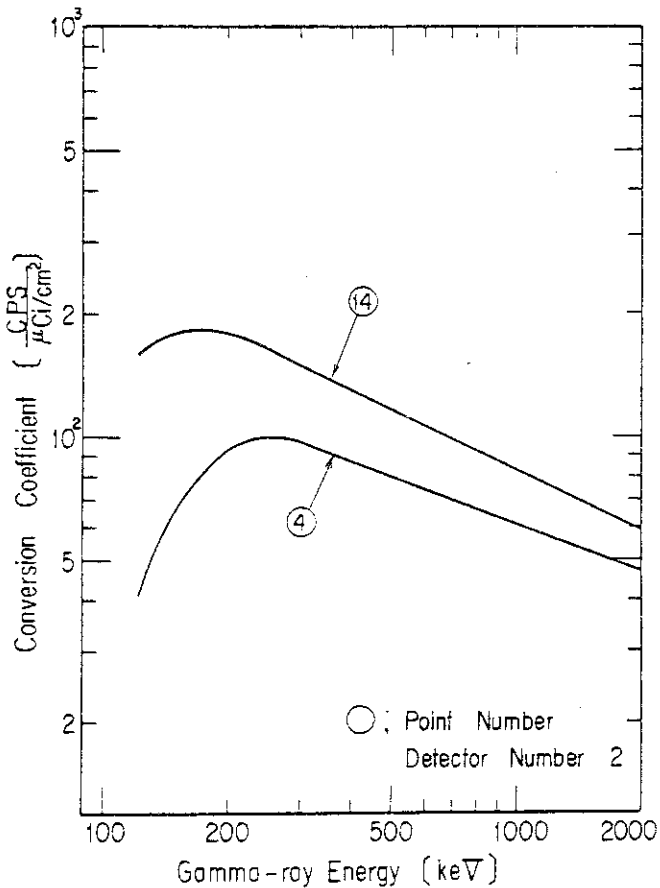


Fig. 28
Conversion Coefficient of Detector Number 2

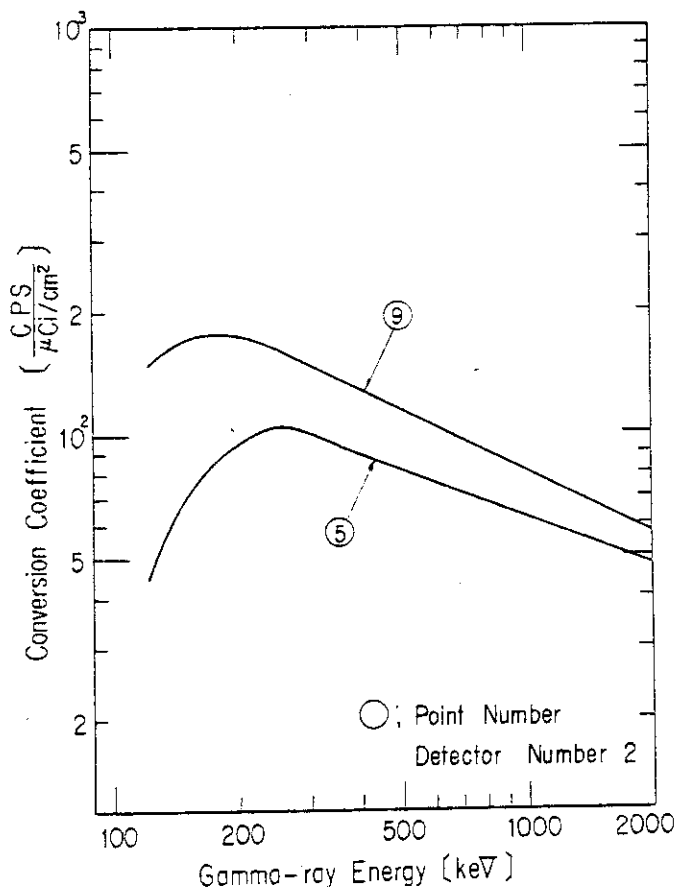


Fig. 29
Conversion Coefficient of Detector Number 2

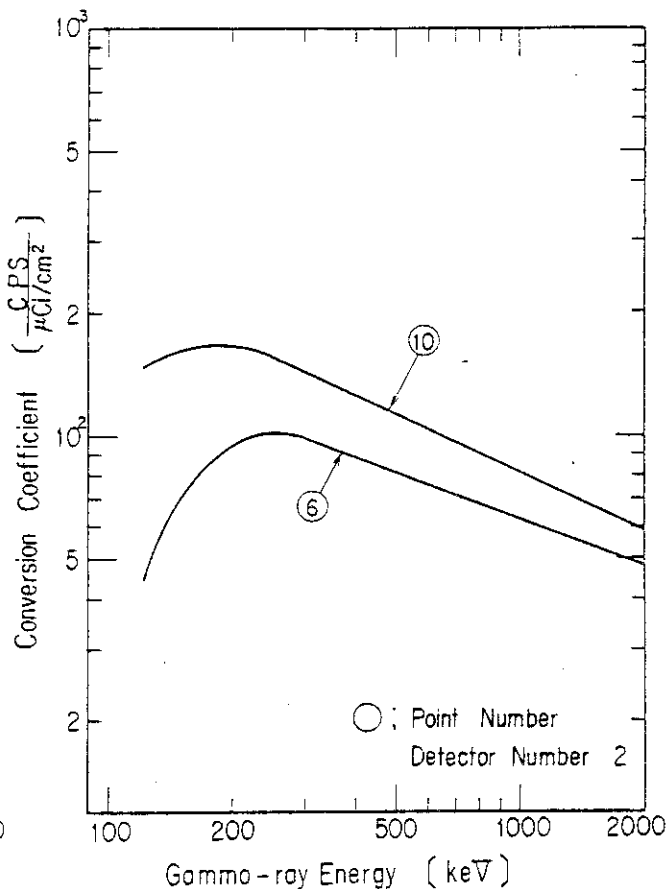


Fig. 30
Conversion Coefficient of Detector Number 2

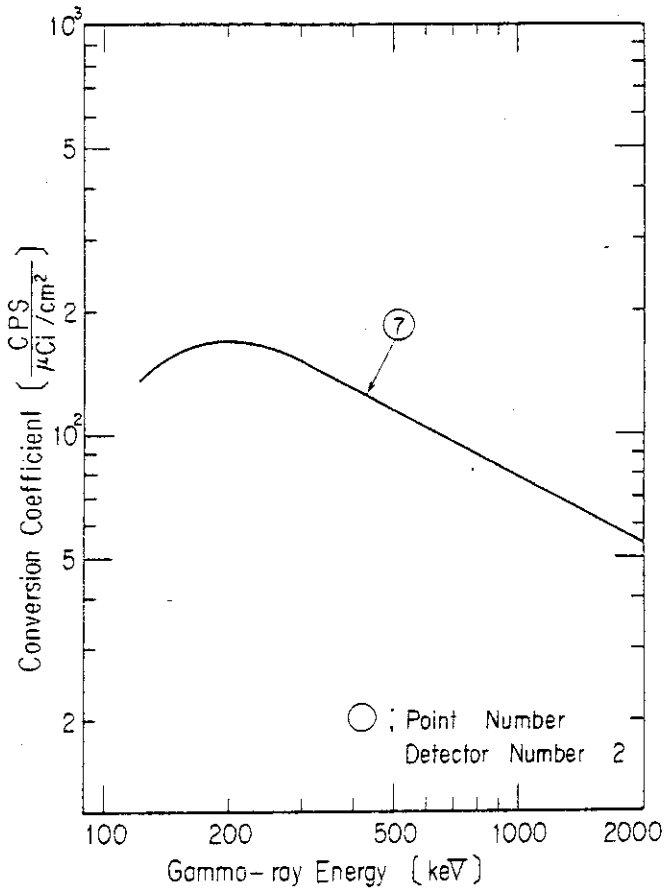


Fig. 31 Conversion Coefficient of Detector Number 2

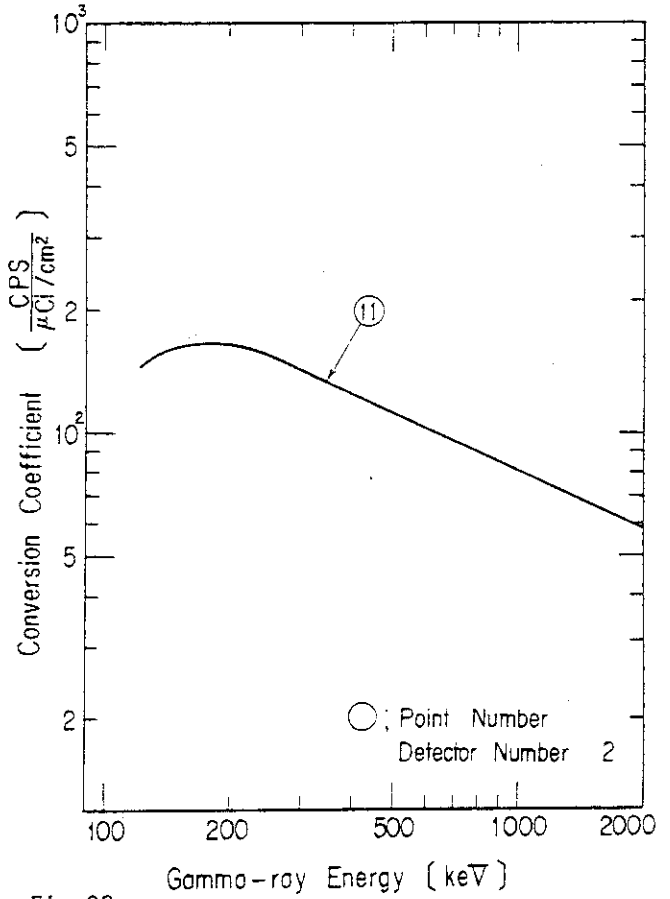


Fig. 32 Conversion Coefficient of Detector Number 2

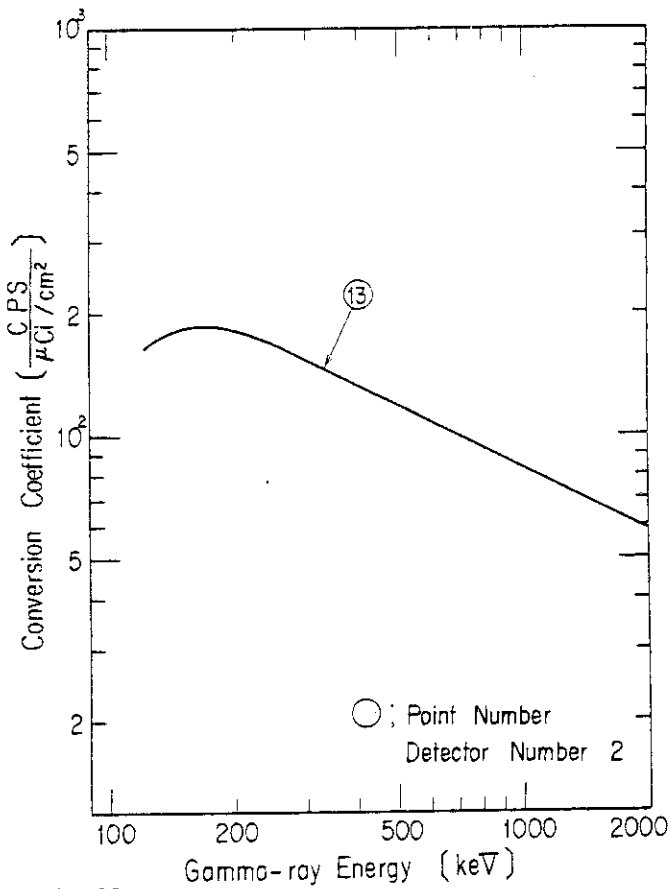


Fig. 33 Conversion Coefficient of Detector Number 2

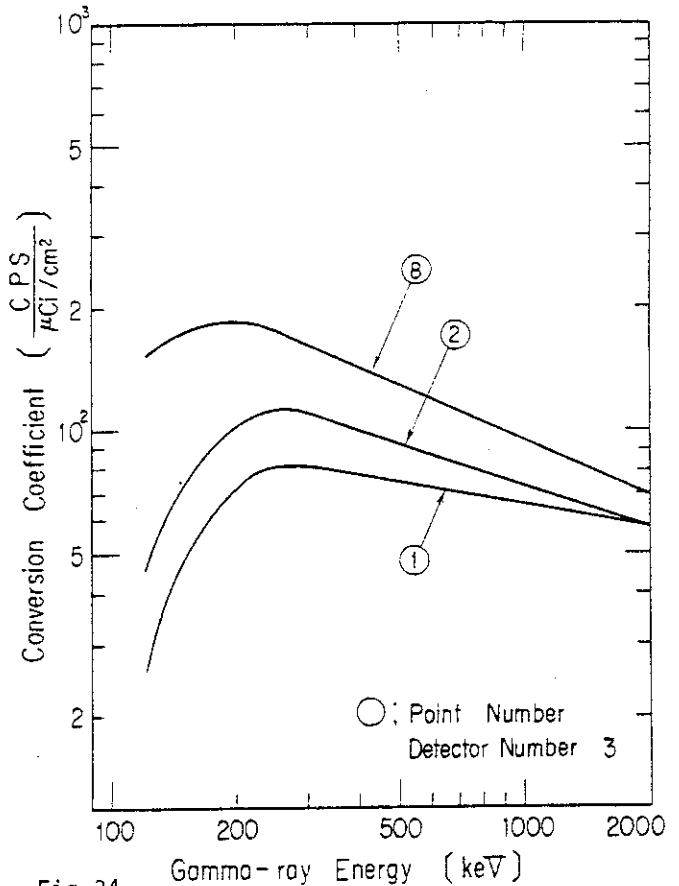


Fig. 34 Conversion Coefficient of Detector Number 3

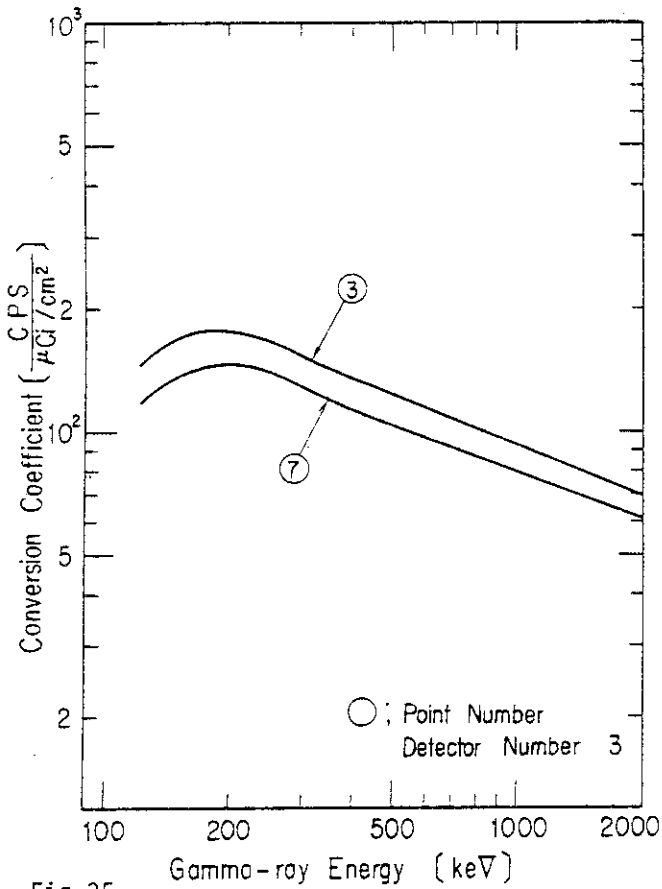


Fig. 35
Conversion Coefficient of Detector Number 3

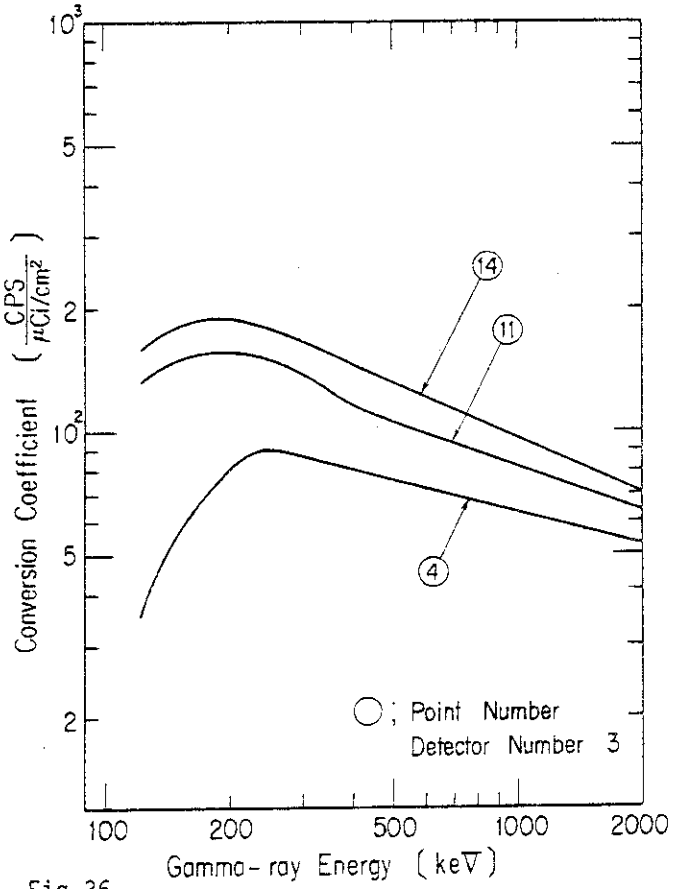


Fig. 36
Conversion Coefficient of Detector Number 3

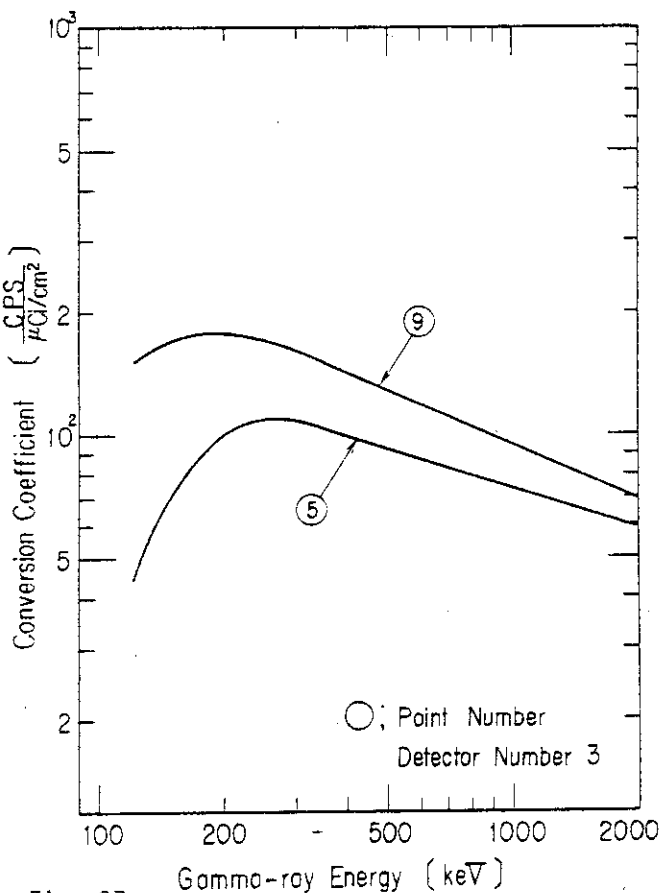


Fig. 37
Conversion Coefficient of Detector Number 3

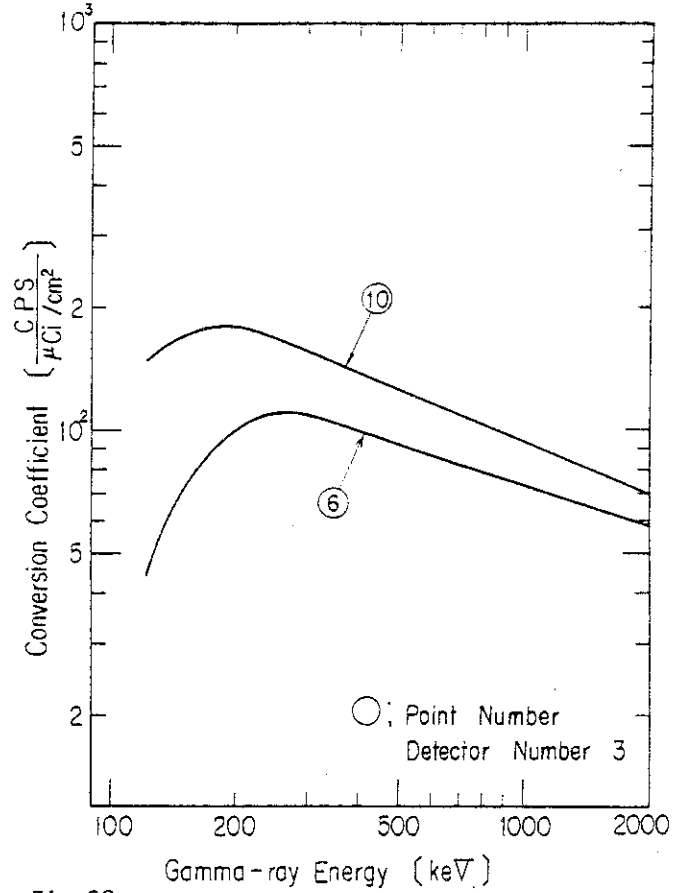


Fig. 38
Conversion Coefficient of Detector Number 3

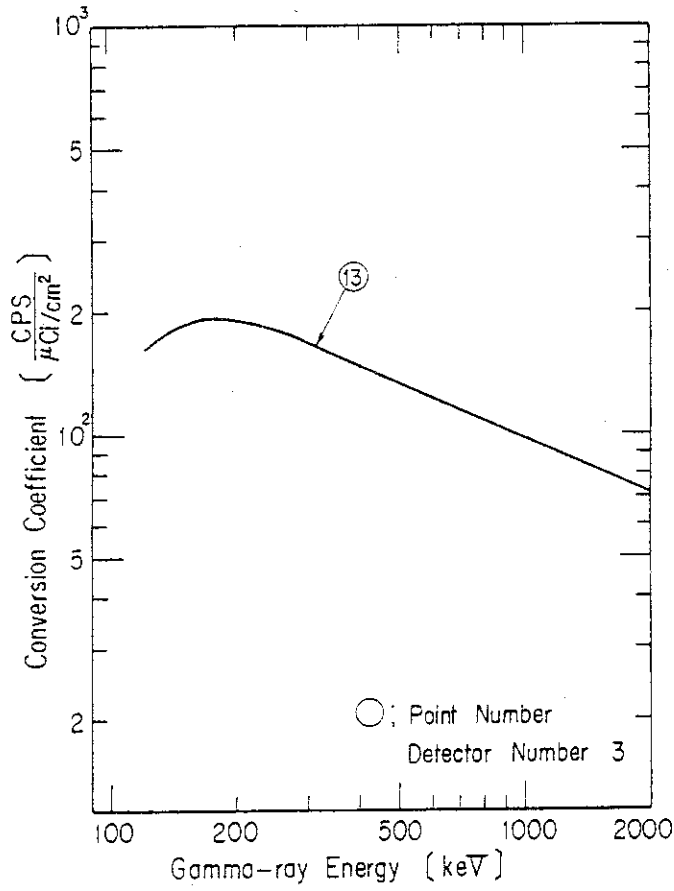


Fig.39 Conversion Coefficient of Detector Number 3

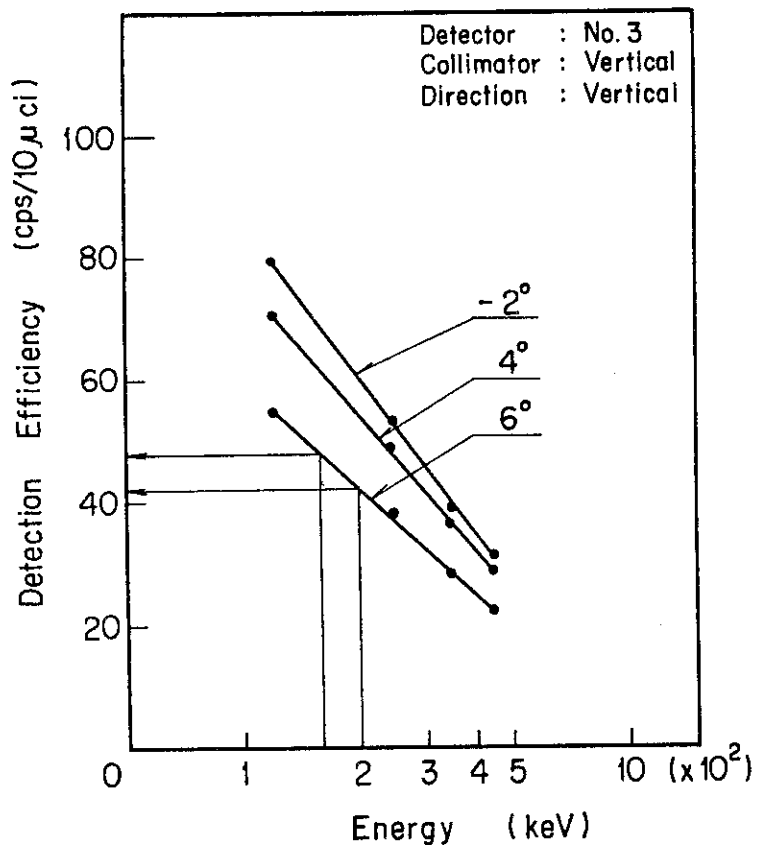


Fig.40 Interpolation of Detection Efficiency

4. 換算係数算出における誤差

4.1 誤差の考え方

今回実施した換算係数算出について、測定系のモデル化の過程で発生した誤差、すなわち、FPの均一沈着およびコリメータ内に納められた検出器の感度分布の中心面に対する相似性の仮定による誤差は別に検討するものとして、FP沈着量の最終算出までに含まれる誤差の検討を行う。

FP沈着量，計数率，換算係数をそれぞれ $PO \mu\text{ci}/\text{cm}^2$ ， $N \text{ cps}$ ， $\eta \text{ total cps}/(\mu\text{ci}/\text{cm}^2)$ とすると

$$PO = \frac{N}{\eta \text{ total}} \quad (12)$$

である。

それぞれの誤差を ΔPO ， ΔN ， $\Delta \eta \text{ total}$ とすると

$$\frac{\Delta PO}{PO} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta \eta \text{ total}}{\eta \text{ total}} \quad (13)$$

となる。一方換算係数およびコリメータの無い検出器の効率はそれぞれ⑧式，⑨式で表わされる。⑧，⑨式に含まれる各パラメータを分類すると次のようになる。

- (1) A ， B ， r ， ℓ_1 ， ℓ_2 ：それぞれコリメータ寸法（縦×横），管内径，管-検出器中心間距離，感度分布測定時の線源-検出器中心間距離
- (2) N ：正味計数率 = N_D （コリメータ窓を開いた時の計数率） - N_B （同閉じた時の計数率）
- (3) S ， Y_γ ：感度分布測定時の線源強度および γ 線放出割合
- (4) F_x ， F_y ：コリメータ前面の感度分布
- (5) F_A ：線源-コリメータ間での γ 線の減衰

これらのパラメータのうち(2)~(5)の各パラメータは、確率現象を対象とした量であり、(1)については主として製作および寸法測定の際に誤差が発生する量である。製作上の公差については、完成品の寸法測定を行い、実測寸法を用いることにより0となり、寸法測定の際に発生した誤差だけが残ることとなる。しかしながら、OGL-1でのプレートアウト測定の場合、複数個の部品の各組み合わせにより測定し、組み合わせ数が多いので、製作公差についても誤差と同等に取り扱うことにする。たとえばコリメータ窓の実測寸法 $A_1 \times B_1$ ， $A_2 \times B_2$ ，…… に対し $A \pm \Delta A$ ， $B \pm \Delta B$ として ΔA ， ΔB に製作公差の値を用いる。

したがって $\ell_1 \gg r$ の場合について、すべてのパラメータによる誤差の寄与を調べると、

$$\frac{\Delta PO}{PO} \doteq \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta r}{r} + 2 \frac{\Delta \ell_1}{\ell_1} + \frac{\Delta \eta_D}{\eta_D} + \frac{\int_0^\pi \Delta F_y d\theta_1}{\int_0^\pi F_y d\theta_1} + \frac{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 (F_x \cdot \Delta F_A + F_A \cdot \Delta F_x) dx}{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 \cdot F_A \cdot F_x \cdot dx}$$

$$= \frac{\Delta N_D + \Delta N_B}{N_D - N_B} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta Y_r}{Y_r} + 2 \left\{ \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta \ell_1}{\ell_1} + \frac{\Delta \ell_2}{\ell_2} \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta N_{x\theta 3=0}}{N_{x\theta 3=0}} + \frac{\Delta N_{y\theta 2=0}}{N_{y\theta 2=0}} \right\} + \frac{\int_0^\pi \Delta F_y d\theta_1}{\int_0^\pi F_y d\theta_1} + \frac{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 (F_x \cdot \Delta F_A + F_A \cdot \Delta F_x) dx}{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 \cdot F_A \cdot F_x dx} \quad (14)$$

ここで F_y について調べると、 F_y 、 ΔF_y はともに θ_1 に対し連続であり、 θ_1 が 0 から π の間で正の値であるので、

$$\frac{\int_0^\pi \Delta F_y d\theta_1}{\int_0^\pi F_y d\theta_1} \leq \left(\frac{\Delta F_y}{F_y} \right)_{\text{Max}} = \Delta F_{yM} \quad (15)$$

⑭式の最後の項について調べると、 F_y の場合と同様に、

$$\frac{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 (F_x \cdot \Delta F_A + F_A \cdot \Delta F_x) dx}{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 \cdot F_A \cdot F_x \cdot dx} = \frac{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 \cdot F_x \cdot F_A \cdot \frac{\Delta F_A}{F_A} dx}{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 \cdot F_A \cdot F_x \cdot dx} + \frac{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 \cdot F_A \cdot F_x \cdot \frac{\Delta F_x}{F_x} dx}{\int_0^\infty \cos^2 \theta_3 \cdot F_A \cdot F_x \cdot dx} \leq \left(\frac{\Delta F_A}{F_A} \right)_{\text{Max}} + \left(\frac{\Delta F_x}{F_x} \right)_{\text{Max}} = \Delta F_{AM} + \Delta F_{XM} \quad (16)$$

ただし、ここで

$$\Delta F_{AM} = \left(\frac{\Delta F_A}{F_A} \right)_{\text{Max}}$$

$$\Delta F_{XM} = \left(\frac{\Delta F_x}{F_x} \right)_{\text{Max}}$$

である。

⑭式の第1項を变形し、更に⑮⑯式を用いると、⑭式は次のようになる。

$$\frac{\Delta PO}{PO} \leq \frac{\Delta N_D}{N_D - N_B} + \frac{N_B}{N_D - N_B} \cdot \frac{\Delta N_B}{N_B} + \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta Y_r}{Y_r} + 2 \left\{ \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta \ell_1}{\ell_1} + \frac{\Delta \ell_2}{\ell_2} \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta N_{x\theta 3=0}}{N_{x\theta 3=0}} + \frac{\Delta N_{y\theta 2=0}}{N_{y\theta 2=0}} \right\} + \Delta F_{yM} + \Delta F_{AM} + \Delta F_{XM} \quad (17)$$

この式の右辺第1項および第2項は測定のために変わる量であるからこれを分離して、

$$E_{r1} = \frac{\Delta N_D}{N_D - N_B} + \frac{N_B}{N_D - N_B} \cdot \frac{\Delta N_B}{N_B} \quad (18)$$

$$E_{r2} = \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta Y_r}{Y_r} + 2 \left\{ \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta \ell_1}{\ell_1} + \frac{\Delta \ell_2}{\ell_2} \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{\Delta N_{x\theta 3=0}}{N_{x\theta 3=0}} + \frac{\Delta N_{y\theta 2=0}}{N_{y\theta 2=0}} \right\} + \Delta F_{yM} + \Delta F_{AM} + \Delta F_{XM} \quad (19)$$

とおくと、

$$\frac{\Delta PO}{PO} \leq E_{r1} + E_{r2}$$

となる。したがって、OGL-1のFP沈着測定の誤差は測定のたびに大きさの異なる誤差 E_{r1} と、検出器とコリメータの組み合わせにより一定の大きさである誤差 E_{r2} の和で求めることができる。また、この後者 E_{r2} はすなわち換算係数の誤差である。

4.2 誤差の評価

4.1で求めた誤差の各成分の大きさをそれぞれ以下に示すようにして求める。

(1) $\Delta A/A$ について

コリメータの製作寸法は、 $A=4.02 \pm 0.1$ であり、すべてのコリメータがこの公差に合格しているので $\Delta A=0.1$ mmであり、 $\Delta A/A \doteq 0.0025$ である。

(2) $\Delta B/B$ について

(1)と同様に $B=10.1 \pm 0.1$ であるので、 $\Delta B/B \doteq 0.0099$ である。

(3) $\Delta r/r$ について

OGL-1における測定点は、1次系炉外部高温配管、中低温配管の二種類があり、それぞれ $r_h=4.49 \pm 0.3$ mmおよび $r_m=2.635 \pm 0.39$ mmである。したがって中低温配管の方が誤差の割合が大きく、 $\Delta r/r = 0.0148$ である。

(4) $\Delta \ell_1/\ell_1$ について

OGL-1の配管は高温運転を行うために熱膨張により変位し、運転後の停止時(配管温度は室温に戻った時点)に完全に戻には戻らず、運転履歴が残ることが多い。また配管の支持構造が、運転時の熱膨張変位を許すよう設計されているため、配管は非常に撓み易く、配管-検出器中心距離は変わり易い。そこで $\Delta \ell_1$ は運転停止後に残っている変位量の最大値として10mmとする。 ℓ_1 は各測定点の中でNo 11の $\ell_1=240$ mmが最小であるから $\Delta \ell_1/\ell_1$ の最大値は0.0417である。

(5) $\Delta s/s$ について

検出器感度分布測定に用いた線源はEu-152の標準線源であり、この線源の検査成績書によると、 $\Delta s/s=0.087$ である。

(6) $\Delta Y_r/Y_r$ について

Eu-152に対する1崩壊当りの γ 線の相対放出割合は、Heathのデータ¹⁾を用いている(Table 5)。この値より $\Delta Y_r/Y_r$ の最大値は、 γ 線エネルギーが121.78Kevに対するもので $\Delta Y_r/Y_r=0.05$ である。

(7) ΔF_{yM} について

検出器感度分布測定の際の最大誤差であり、測定値より $\{\Delta F_{yM}\}_{\text{Max}}=0.02$ である。

(8) ΔF_{xM} について

(7)と同様に、実測値より $\{\Delta F_x/F_x\}_{\text{Max}}=0.05$ である。

(9) ΔF_{AM} について

線源とコリメータの間に存在し、 γ 線の減衰に寄与する物体の寸法、密度、 γ 線質量減衰係数などの誤差によるものである。したがって ΔF_{AM} は次式で求めることができる。

$$\Delta F_{AM} = \frac{\exp\{-\sum_i(\mu_i - \Delta\mu_i) \cdot (t_i - \Delta t_i) \cdot (\rho_i - \Delta\rho_i)\}}{\exp\{-\sum_i\mu_i \cdot t_i \cdot \rho_i\}} - 1.0$$

この値は γ 線のエネルギーが小さいほど大きく、 γ 線に対する遮蔽効果の大きい測定点ほど大きくなる。

OGL-1建設時の検査結果より配管肉厚および標準偏差を求めると、仕切管と内壁管については $t=2.077 \pm 0.050$ mm, 高温配管圧力管は $t=8.345 \pm 0.149$ mm, 中低温配管圧力管は $t=3.978 \pm 0.118$ mmである。管材料密度は同一材料のバラッキについては無視できるが、最大のバラッキとして0.5%の増減を仮定する。内部断熱材の密度は検査成績書より $\rho=0.1783 \pm 0.0149$ g/cm³である。 γ 線の質量吸収係数については、ハンドブックの読み取り誤差を0.5%とする。 ΔF_{AM} について求めた結果をTable 6に示す。

(10) $\Delta l_2/l_2$ について

検出器感度分布測定の際の、線源-検出器中心間距離の誤差であり、 $l_2=350$ mmに対し $\Delta l_2=2$ mmである。したがって $\Delta l_2/l_2=0.0057$ である。

(11) $\Delta N_{x\theta 3=0}/N_{x\theta 3=0}$ および $\Delta N_{y\theta 2=0}/N_{y\theta 2=0}$ について

測定値よりこれらの値はいずれも0.006である。

以上の各値を⑬式に入れて求めたものをTable 7に示す。各測定における総合誤差は表中の値に⑬式の値を加えたものである。

⑬式の値は沈着量が多く、測定に十分な時間をかけた場合には小さくなる。しかしながら、OGL-1の場合、沈着量が少ないため、測定時間を約20時間を選んででもなおかつ⑬式の値は大きい。概略の値としては、沈着核種の測定に用いる γ 線の放出率が100%の場合、 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} $\mu\text{ci}/\text{cm}^2$ の各沈着量に対し、 $E_{\gamma 1}$ の値はそれぞれ約0.004, 0.013, 0.04, 0.15程度である。

以上の結果を整理して次に示す。

- (1) 今回求めた換算係数による測定誤差は、最も少ない場合でも約32%である。
- (2) 測定誤差の大きさは γ 線のエネルギー、およびFP沈着量に依存している。
- (3) 測定誤差は γ 線のエネルギーが200 keV以下になると急に大きくなり、40%以上にもなり得る。
- (4) 今回求めた換算係数における誤差の原因のうち、大きなものは、a, 較正用に用いた標準線源強度の検定誤差, b, 測定点と検出器, コリメータの相互位置の移動によるもの, c, FP沈着部と検出器の間に存在する配管壁などによる γ 線の減衰, d, 標準線源に用いたEu-152の γ 線放出割合の不確かより生じるもの, およびe, 検出器感度分布測定上の誤差によるものである。
- (5) 以上の結果より、FP沈着測定精度を向上させるために有効な方法は、a, 較正用標準線源として、より精度の高いものを入手する。b, 現在固定されているコリメータを、配

管の移動に合わせて移動ができるよう改造する。c, 検出器感度分布測定は, 今回の方法でもすでに測定時間が長いため, 線源強度の高い標準線源を用いて, 短時間で測定精度を向上させる。

- (6) (5)に示した a, b, c を改善することにより E_{r2} の値を約 0.15 程度小さくすることができる。
- (7) $\Delta Y_r / Y_r$ の値については, $Eu-152$ 以外の核種を標準線源として用いれば, 別の値となるが, 大巾に改善されることは期待できない。
- (8) ΔF_{AM} は値が大きいが, この値を改善するのは困難であり, 配管外面から実施する非破壊測定法の有する欠点である。

Table 5 γ -ray Relative Yield in Eu-152¹⁾

Energy (kev)	121.8	244.7	344.3	778.9	964.0	1112.1	1408.0
Yield (%)	102 \pm 5.1	28.5 \pm 1.3	100 \pm 4.7	50.0 \pm 2.0	54.7 \pm 0.23	50.87 \pm 2.2	79.86 \pm 3.5

1) ANCR-1000

Table 6 Value of ΔF_{AM}

Energy(kev) Position	121.8	244.7	344.3	778.9	964.0	1112.1	1408.0
High Temp Piping	0.095	0.045	0.036	0.024	0.022	0.020	0.017
Low Temp Piping	0.060	0.034	0.028	0.019	0.017	0.016	0.014

Table 7 Value of E_{r2}

Energy(kev) Position	121.8	244.7	344.3	778.9	964.0	1112.1	1408.0
High Temp Piping	0.442	0.388	0.380	0.361	0.324	0.361	0.358
Low Temp Piping	0.407	0.378	0.372	0.356	0.319	0.357	0.355

5. 結論及び考察

今回、OGL-1のFP沈着量測定の換算係数を求めた結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 換算係数は、FPが沈着している個所の形状が直管のように単純な場合には、コリメータ内に納められた検出器の感度分布の実測と、沈着面からコリメータに至るまでの γ 線の減衰計算の組み合わせにより求めることができる。
- (2) 今回求めた換算係数に含まれる誤差の主なものは、較正用に用いた標準線源の検定誤差、測定点、コリメータの相互位置の移動、コリメータに至るまでの γ 線の減衰評価の誤差、較正用線源核種の γ 線分岐割合の評価誤差および検出器感度分布測定上の統計誤差である。
- (3) 今回求めた換算係数の誤差は31～43%と非常に大きい。標準線源の選択、コリメータ固定法の改良、各コリメータ、管径、肉厚の詳細測定等により、大巾に改善することができる。
- (4) 今回得られたFig. 19～39の換算係数を調べると、各検出器共に、高温配管上の測定点②、④、⑤、⑥および中低温配管上の測定点③、⑦～⑪、⑬、⑭の換算係数が非常に近い値であることがわかる。これらの各測定点における検出器—管中心間距離はすべて異っている点を考慮すると、1.2測定上の問題と対策で述べた配管移動に対する対策が有効であった結果と言える。すなわち、長方形のコリメータの長軸の方向を、配管の中心線方向と一致させることにより、コリメータを通して見込む配管面積をできるだけ大きく確保し、同時に検出器位置での γ 線束は、線源からの距離による減少と、コリメータを通して見込む線源面積の増大が相殺しほぼ一定となった。この結果、配管—検出器間距離が多少変化しても、換算係数は変化しないこととなった。
- (5) 検出器—配管中心間距離の変動に対処するため、水平垂直の配管に対し、それぞれ横型、縦型のコリメータを用いたが、このために感度分布測定に要する時間が2倍になった。
- (6) 今回実施した換算係数算出に於ける問題点は、得られた換算係数の精度の他に、算出のための所要時間が長いことである。所要時間の大部分は検出器感度分布の実測に要する時間である。この対策としては、測定に使用する標準線源強度を上げ測定時間を短縮させる方法が有効であるが、この他に、検出器感度分布を、適当な仮定のもとに計算で求める方法と、検出器相互の差を1点で代表させ、比較較正する方法がある。

前者の検討のために、鉛コリメータとGe結晶の幾何学的配置、大きさより検出器感度分布を求める計算プログラムを作成した。このプログラムの考え方は次の様なものである。

- i) Ge結晶中では、入射 γ 線が光電効果を起こす確率は位置に依存しない。
- ii) 鉛コリメータとGe結晶の幾何形状は2次元平面とする。すなわちGe結晶軸方向には無限に続いているものとする。

以上の考え方のもとに作成したプログラムの計算結果と、実測結果の比較例をFig. 41, 42に示す。図より低エネルギーの γ 線に対して、計算による感度分布は、実測結果に近いが、高エネルギーでは違っている。この原因は、現在までのところ明らかになっていない。

しかしながら、感度分布形状は良く似ており、更に原因調査の上計算プログラムの改良により、感度の実測は1点とし、他は計算で求めることができるものと考えられる。

後者の検討のために、No.1～3の検出器の感度分布の比較例をFig.43に示す。この図より感度分布は、検出器相互で異なっていることがわかる。したがってGe結晶寸法等を無視して、検出器の感度分布を1個の検出器で代表させる方法は、大きな誤差を生じさせる原因となり、適切ではない。

したがって換算係数を短期間で精度良く求めるための今後の方向としては、感度分布測定に用いる標準線源を大きなものと交換し、自動測定させる方向、および、感度分布計算のためのプログラムの改良である。

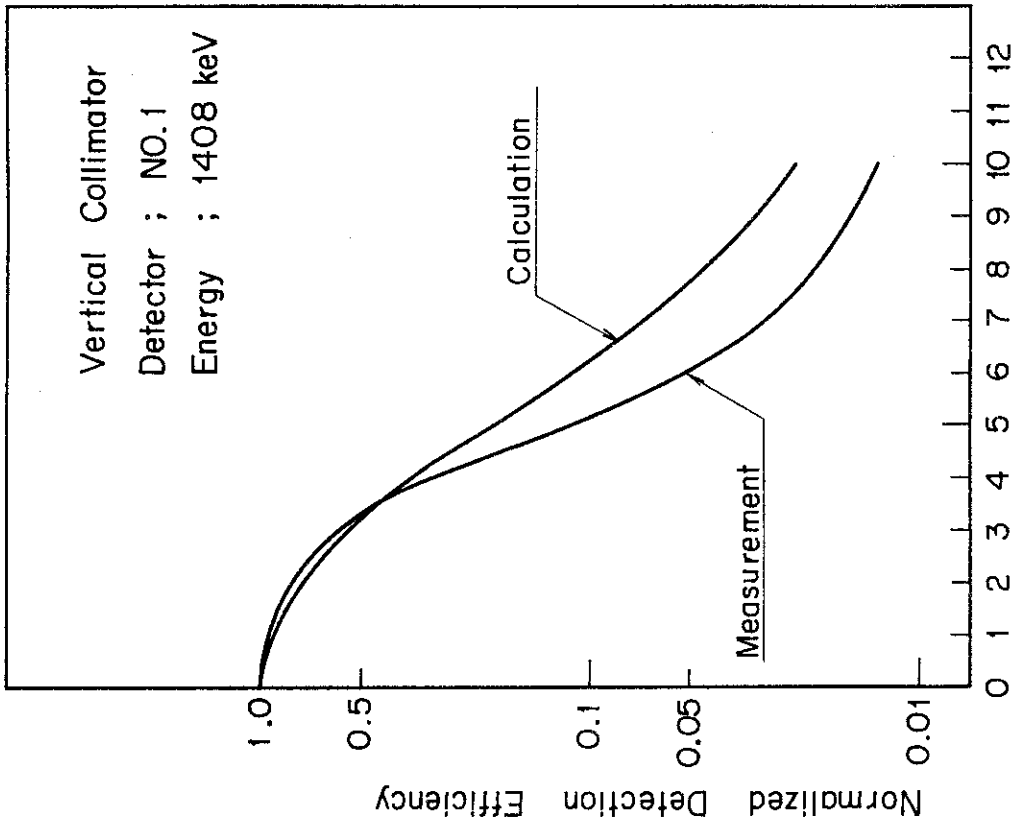
- (7) 今回求めた検出器換算係数の妥当性の確認のために、比較的容易に実験できる管外面に一樣にプレートアウトさせた試料に相当する場合について検討した。

検討した対象はOGL-1の照射試料のハンガーロッド(ハステロイ-X製、 $\phi 30$ -O.D. $\times \phi$ -15 I. D.)である。

実験は、垂直のハンガーロッドを、垂直のコリメータを付けた遮蔽体に収納したNo.3検出器で測定する場合について行った。実験ではハンガーロッド外面を適当なピッチで等間隔にメッシュ分割し、分割点上に検出器感度分布測定に用いたEu-152の標準線源を置き、各点に対する計数率を求めた。使用した標準線源強度をメッシュ面積で除してプレートアウト量とし、各点の計数率を積算して一樣にプレートアウトしている管の計数率とした。この計数率と、プレートアウト量から、ハンガーロッドのプレートアウト量を測定する際のNo.3検出器の換算係数を求めた。

こうして求めた換算係数と、同じ配置に対しKKKPを使って計算により求めた換算係数をFig.44に示す。図より、KKKPの計算により求めた換算係数と、メッシュ点上の点線源の計数率の和より求めた換算係数が、良く一致している。

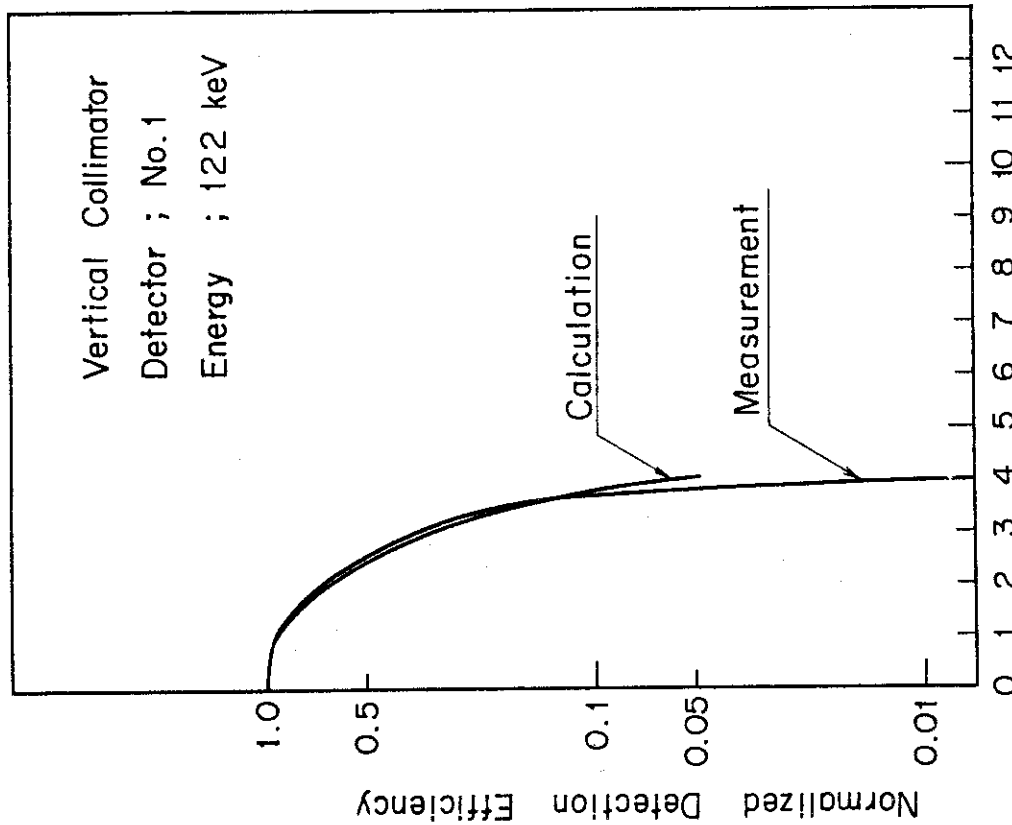
以上の検討から、今回求めた換算係数(検出器感度分布とKKKPによる計算)の1つの例の妥当性が確認された。



Gamma-ray incident angle, θ (deg.)

Horizontal Direction Characteristics

Fig.42 Comparison of Normalized Detection Efficiency between Calculation and Measurement



Gamma-ray incident angle, θ (deg.)

Horizontal Direction Characteristics

Fig.41 Comparison of Normalized Detection Efficiency between Calculation and Measurement

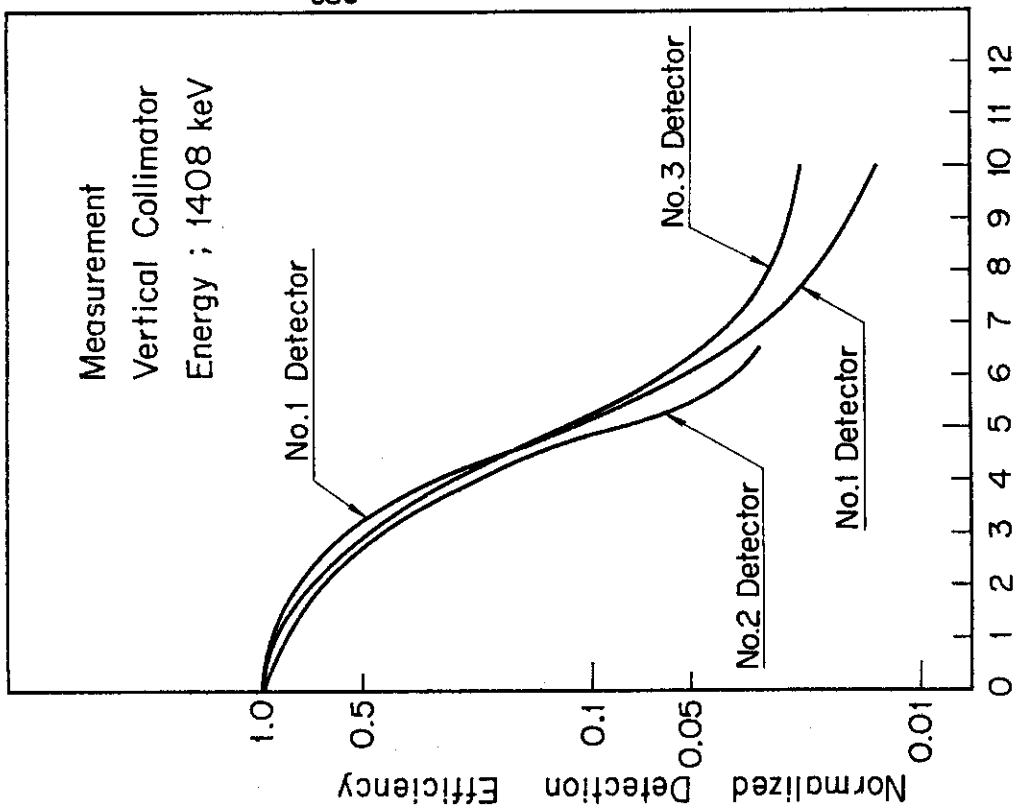


Fig.43 Horizontal Direction Characteristics of Detector No.1, 2 and 3

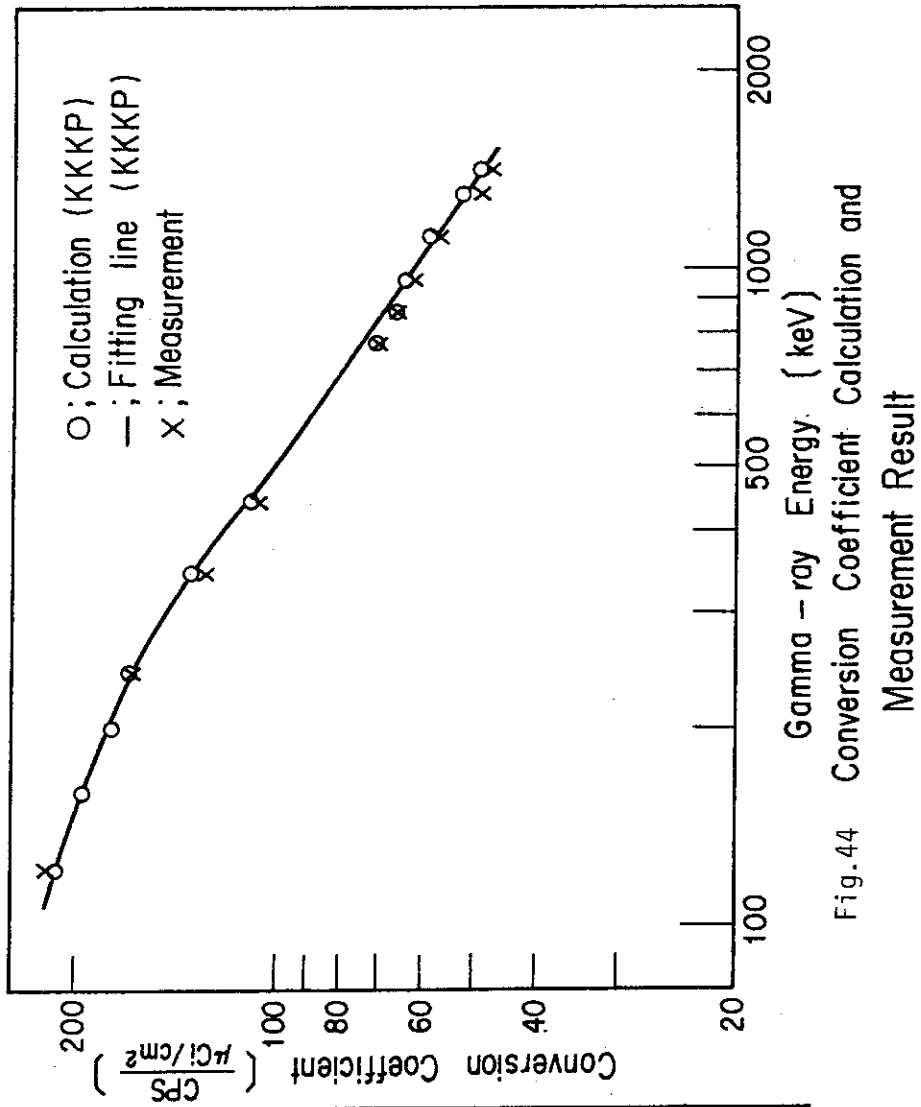


Fig.44 Conversion Coefficient Calculation and Measurement Result

あ と が き

換算係数算出のための基礎データである。検出器感度分布測定は、手際良く行っても1台の検出器につき約3ヶ月を要する。また検出器台数が複数の場合、実験装置の容量から1台ずつシリーズに行わなければならない。その間にJ M T Rの運転期間があり、J M T R運転に伴う各種測定のための中断およびO G L-1一次系配管のF Pプレートアウト測定のための中断などがある。これらのことから3台の検出器の感度分布測定およびハンガーロッドの換算係数測定に約1年4ヶ月かかってしまった。

検出器感度分布測定は、このための専用の装置が無くJ M T Rの地下2階の計算機室内に、コリメータ付遮蔽体を設置して行った。この測定は、検出器を新たに購入した場合、検出器破損によるクリスタル交換が行われた場合などは、その都度実施しなければならない。今後F Pプレートアウト測定の頻度および実験項目の増加することを考えると、能率良く検出器感度分布測定ができる専用の装置が必要である。

謝 辞

本報告で行った検出器感度分布測定の際、線源の決定、検出器、コリメータ配置測定方法の決定等について原子炉計測研究室の寺田博海氏および片桐政樹氏に、また報告書作成に際しては、照射第1課長代理田中勲氏、同中田宏勝氏に多くの有益な助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。本報告で実施した各測定実験、特にハンガーロッドに対する換算係数測定の際には、照射第2課照射第4係長坪長氏以下各位に御協力いただいた。心から感謝いたします。

あ と が き

換算係数算出のための基礎データである。検出器感度分布測定は、手際良く行っても1台の検出器につき約3ヶ月を要する。また検出器台数が複数の場合、実験装置の容量から1台ずつシリーズに行わなければならない。その間にJ M T Rの運転期間があり、J M T R運転に伴う各種測定のための中断およびO G L-1一次系配管のF Pプレートアウト測定のための中断などがある。これらのことから3台の検出器の感度分布測定およびハンガーロッドの換算係数測定に約1年4ヶ月かかってしまった。

検出器感度分布測定は、このための専用の装置が無くJ M T Rの地下2階の計算機室内に、コリメータ付遮蔽体を設置して行った。この測定は、検出器を新たに購入した場合、検出器破損によるクリスタル交換が行われた場合などは、その都度実施しなければならない。今後F Pプレートアウト測定の頻度および実験項目の増加することを考えると、能率良く検出器感度分布測定ができる専用の装置が必要である。

謝 辞

本報告で行った検出器感度分布測定の際、線源の決定、検出器、コリメータ配置測定方法の決定等について原子炉計測研究室の寺田博海氏および片桐政樹氏に、また報告書作成に際しては、照射第1課長代理田中勲氏、同中田宏勝氏に多くの有益な助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。本報告で実施した各測定実験、特にハンガーロッドに対する換算係数測定の際には、照射第2課照射第4係長坪長氏以下各位に御協力いただいた。心から感謝いたします。

参考文献

- (1) 松永朔郎, 他「高温ヘリウムインパイルガスループ(OGL-1)の建設と性能試験」原子力学会誌, vol 21, No. 3, 39 (1971)
- (2) D. L. Hanson, N. L. Baldwin, W. E. Selph: Gamma Scanning the Primary Circuit of Peach Bottom HTGR, GA-A14161, (1976)
- (3) Selph, W. E., Bryan, D. E.: Measurement of Fission Product Activity in the Peach Bottom Reactor Primary Coolant Loop, GA-A 14059, (1976)
- (4) F. F. Dyer, R. P. Wichner, W. J. Martin, H. J. de Nordwall: Distribution of Radionuclides in the Peach Bottom HTGR Primary Circuit During Core-2 Operation, ORNL-5188, Mar., 1977
- (5) 片桐政樹, 寺田博海, 高橋秀武「可搬型Ge(Li)検出器を使用したFPプレートアウト測定-OGL-1 FPプレートアウト測定のための予備測定実験-」, 1978年3月. JAERI-M 7579
- (6) H. Terada, M. Katagiri, H. Takahashi, N. Wakayama, T. Tanaka: Non-Destructive Measurement of Fission Product Plate-out using In-Situ Ge(Li) Gamma-ray Spectrometer, Proceedings of Second U. S. Japan Seminar on HTGR Safety Technology vol. 1 (1978)
- (7) H. Terada, M. Katagiri, H. Takahashi, N. Wakayama: In-Situ Measurement of Fission Product Plateout in In-Pile Gas Loop Using Portable Ge(Li) Gamma-Ray Spectrometer, J. Nucl. Sci. Tech. vol. 17 No. 3, 225~240 March 1980
- (8) 馬場治他「FP・プレートアウト非破壊測定装置の設計, 製作, 特性試験」JAERI-M レポート投稿予定
- (9) O. Baba: F. P. Plate-out Study using In-pile Loop OGL-1, IAEA Specialists' Meeting on Coolant Chemistry, Plate-out and Decontamination in Gas-cooled Reactors. (1980)